



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG



Bewertung von Technologie- konfigurationen für den Straßengüterverkehr

Julia Pelzeter, Julius Jöhrens, Hinrich Helms | ifeu
Martin Ruscher, Markus Werner | TU Dresden
Wolf-Peter Schill | DIW Berlin

Heidelberg / Dresden / Berlin, Oktober 2024

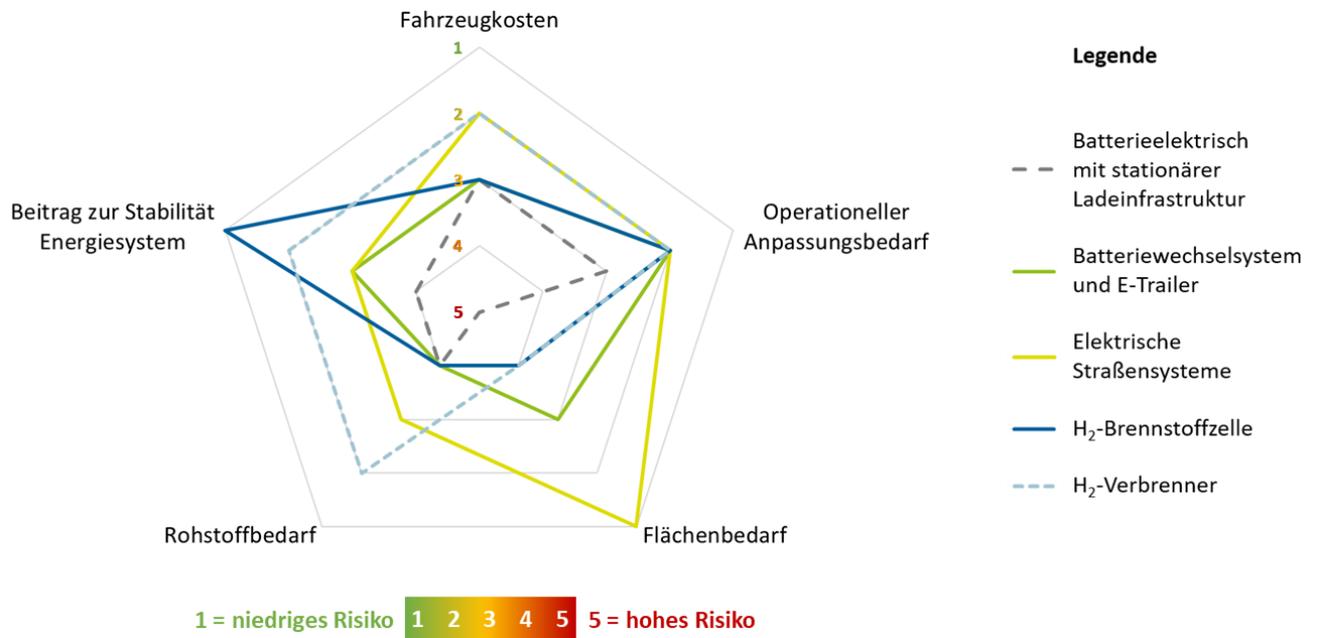
Zitierempfehlung: Pelzeter, J.; Ruscher, M.; Schill, W.; Jöhrens, J.; Helms, H.; Werner, M. (2024):
Bewertung von Technologiekonfigurationen für den Straßengüterverkehr. ifeu, TU Dresden, DIW
Berlin.

Zusammenfassung

- Stationär geladene Batteriefahrzeuge („BEV/LIS“) bilden nach aktuellem Stand das Rückgrat der Antriebswende im Lkw-Verkehr, ihr Markthochlauf begegnet aber ernstzunehmenden Herausforderungen.
- Dieses Papier untersucht anhand einer semi-quantitativen Screening-Analyse, wie BEV/LIS bei für die Antriebswende zentralen Bewertungsindikatoren im Vergleich zu anderen technologischen Optionen stehen. Als solche „Komplementärtechnologien“ wurden dynamisches Laden (ERS), Batteriewechselsysteme (BWS), H₂-Nutzung in Brennstoffzelle (H₂-FCEV) oder Verbrennungsmotor (H₂-ICEV) sowie E-Trailer betrachtet.
- Anhand der Ergebnisse erscheint es plausibel, dass BEV/LIS auch mittel- bis langfristig eine zentrale Rolle beim klimafreundlichen Lkw-Verkehr einnehmen werden.

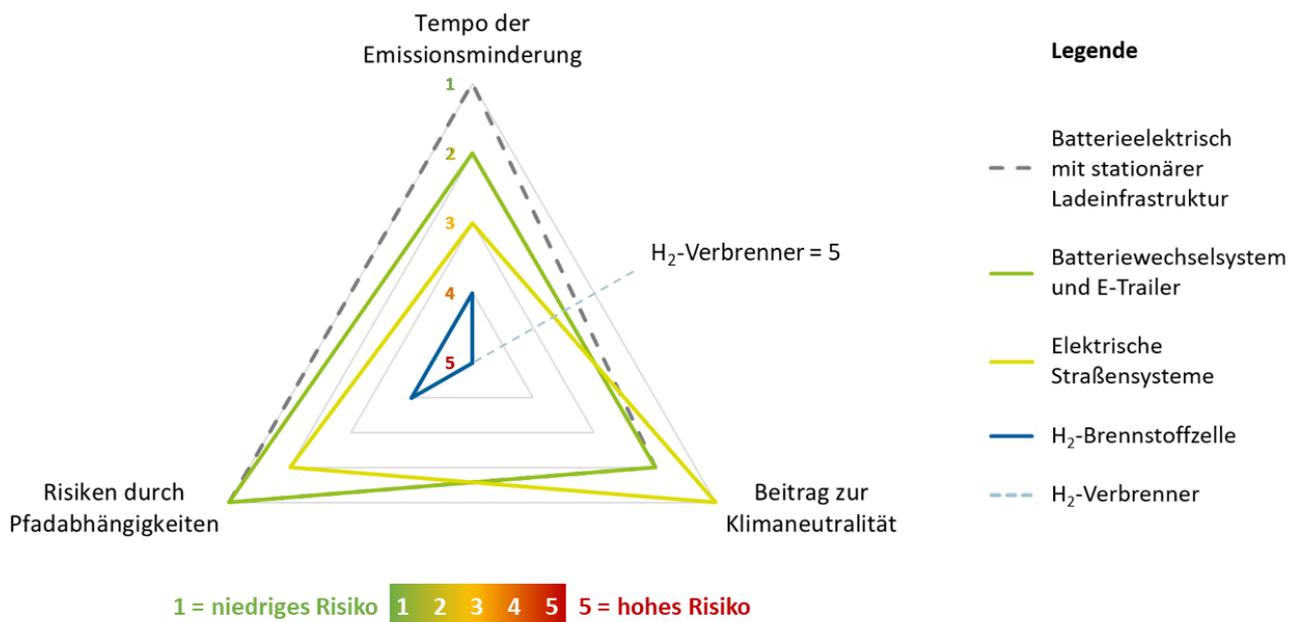
- Komplementärtechnologien adressieren jeweils unterschiedliche Herausforderungen von BEV/LIS, jedoch zeigt keine der untersuchten Technologien in der Gesamtschau deutliche Vorteile. Auch bringen sie jeweils ihre eigenen Herausforderungen mit.

Potenzial der Komplementärtechnologien zum Ausgleich der Schwachstellen von Batterie-Lkw



- Während BWS, E-Trailer und ERS prinzipiell als Ergänzungen in einem Ökosystem rund um BEV/LIS denkbar sind, bedeutet der Einsatz von H₂ das Beschreiten eines gänzlich anderen Pfades, mit Risiken insbesondere für die Geschwindigkeit der Antriebswende und den tatsächlichen langfristigen Beitrag zur Klimaneutralität.

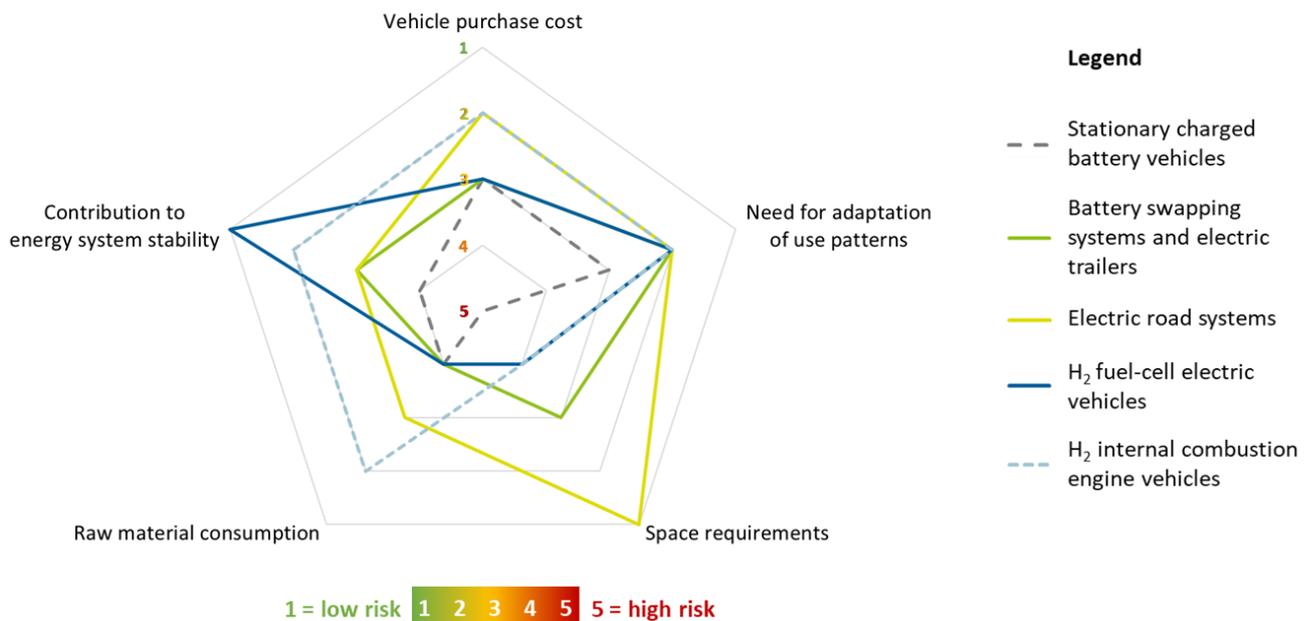
Klimapolitische Effektivität (Synthesekriterien)



Abstract

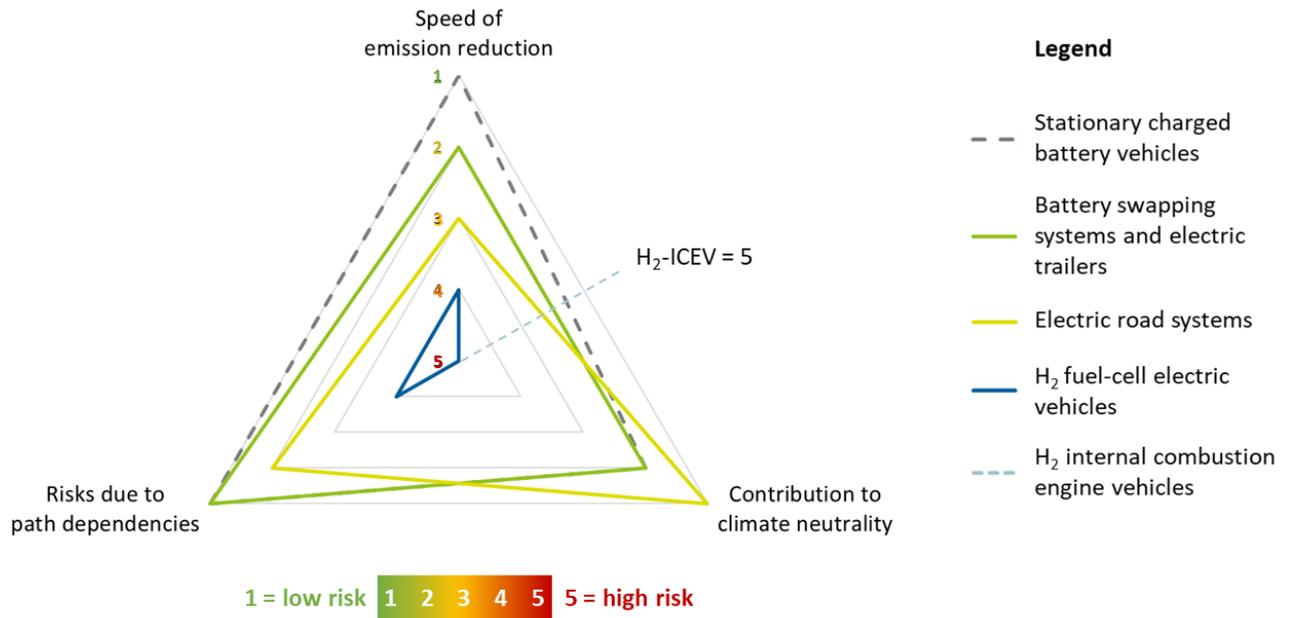
- Stationary charging for battery electric vehicles (SC-BEV) will most likely form the backbone of energy supply for electric trucking, but market ramp-up of this technological configuration faces serious challenges.
- This paper establishes some key criteria for a quick and effective decarbonisation in road freight transport. Based on these criteria, we use a semi-quantitative screening analysis to examine how SC-BEV compare to other technological options. The following “complementary technologies” were considered: dynamic charging (electric road systems), battery swapping, hydrogen use in fuel cell vehicles (H₂-FCEV) or internal combustion engine vehicles (H₂-ICEV), and electric trailers.
- The results suggest that SC-BEV will play a central role in zero-emission trucking also in the medium to long term.
- Complementary technologies each address different challenges of SC-BEV, but none of the technologies examined show clear advantages in the overall picture. They also each bring their own challenges.

Ability of complementary technologies to address shortcomings of stationary charged battery trucks



- Battery swapping, electric trailers and electric road systems are generally conceivable as additional components to an ecosystem around SC-BEV. However, the use of hydrogen in road freight transport means taking a completely different path, with risks particularly in terms of transition speed and actual long-term contribution of the technology transition to climate neutrality.

Speed and effectiveness of decarbonisation



Inhalt

Abstract	1
Inhalt	2
Glossar	5
1 Hintergrund und Ziel	6
2 Technologiekonfigurationen	8
3 Bewertungsmatrix	9
4 Bewertung der Technologiekonfigurationen	10
4.1 Technologie: Technologische Reife und Standardisierung	11
4.2 Nutzung: Nutzerakzeptanz und operationeller Anpassungsbedarf	13
4.3 Wirtschaftlichkeit: Fahrzeug- und Energiekosten	16
4.4 Energiesystem: Stabilität, Flexibilität der Lastkurve und Netzintegration	18
4.5 Infrastrukturaufbau: Bedarf, Investitionsvolumen, Geschwindigkeit und Fläche	23
4.6 Kritikalität: Rohstoffbedarf	26
4.7 Politik: Entscheidungsnotwendigkeit	29
4.8 Synthesekriterien	30
5 Fazit und Schlussfolgerungen	34
Literaturverzeichnis	39

Glossar

Abkürzung	Erläuterung
AFIR	Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (auf Englisch: alternative fuels infrastructure regulation)
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (auf Englisch: battery electric vehicle)
BWS	Batteriewechselsystem
CCS	Kombiniertes Ladesystem (auf Englisch: combined charging system)
ERS	Elektrische Straßensysteme (auf Englisch: electric road systems)
FCEV	Brennstoffzellenfahrzeug (auf Englisch: fuel cell electric vehicle)
H ₂	Wasserstoff
ICEV	Verbrennerfahrzeug (auf Englisch: internal combustion engine vehicle)
LIS	Ladeinfrastruktur
LSO	Ladestandort
MCS	Megawatt-Ladesystem (auf Englisch: megawatt charging system)
O-BEV	Oberleitungsbatterieelektrisches Fahrzeug
OL	Oberleitung
REX	Range-Extender
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
TCO	Gesamtbetriebskosten (auf Englisch: total cost of ownership)
THG	Treibhausgas
TRL	Technologie-Reifegrad (auf Englisch: technology readiness level)

1 Hintergrund und Ziel

Eine rasche Antriebswende bei Lkw¹ ist zentral für die mittelfristige Reduktion von Treibhausgasen (THG) im Straßengüterverkehr und auch eine notwendige Bedingung zur Erreichung der bis 2045 angestrebten Klimaneutralität Deutschlands. In Vorläuferprojekten und am Markt zeigte sich bereits, dass der batterieelektrische Lkw in der Antriebswende eine zentrale Rolle einnehmen wird (Jöhrens et al. 2023; NOW GmbH 2023a). Unter aktuellen Bedingungen sind batterieelektrische Lkw ohne Förderung zwar noch nicht in allen Bereichen wirtschaftlich, die Skalierung und weitere technologische Optimierung der Fahrzeug- und Batterieproduktion lassen für die kommenden Jahre aber erheblich sinkende Fahrzeugpreise erwarten. Gleichzeitig verteuert der CO₂-Aufschlag bei der Maut den Betrieb von Diesel-Lkw bereits heute.

Ab etwa 2030 dürfte die Nutzung von Strom im Lkw daher auch ohne Förderung signifikant günstiger sein als die von Diesel. Die Marktdiffusion von E-Lkw wird dann nicht mehr allein durch deren Wirtschaftlichkeit, sondern u.a. durch die Verfügbarkeit der Ladeinfrastruktur begrenzt sein. Während für E-Lkw im Nah- und Regionalverkehr in der Regel betriebliche Ladeinfrastruktur ausreichen dürfte, ist öffentliche Ladeinfrastruktur eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz von E-Lkw im Fernverkehr. Für sämtliche stationäre Lkw-Ladeinfrastrukturen sind in der Regel erhebliche Netzanschlusskapazitäten notwendig, deren Bereitstellung mit beträchtlichen Vorlaufzeiten verbunden sein kann.

Im Projekt enERSyn geht es daher nun um die Bewertung von Technologien für die Energieversorgung elektrischer Lkw. Dabei soll untersucht werden, welche Technologien komplementär zur stationären (Schnell-)Ladung eingesetzt werden könnten und welchen Herausforderungen des Ladeinfrastrukturausbaus damit begegnet werden kann bzw. welche Vorteile sich durch deren Einsatz erzielen ließen. Ein isolierter Vergleich verschiedener Energieversorgungssysteme unter standardisierten Bedingungen reicht für eine Analyse nicht aus, sondern eine systemische Betrachtung ist notwendig, da auch andere Optionen der Energieversorgung Einfluss auf die nötigen Ausbaumengen stationärer Ladeinfrastruktur (inkl. Netzanschlüssen und Flächenbedarfen) und damit auch auf Kosten und Ausbaugeschwindigkeit haben.

In enERSyn sollen daher nicht komplementäre Einzeltechnologien, sondern Kombinationen verschiedener Technologiekonfigurationen bestehend aus Fahrzeug und Infrastruktur bewertet werden. Eine solche Kombination könnten beispielsweise Batterie-Lkw für den Verteilerverkehr mit einem geringen Anteil an öffentlichem Schnellladen und Oberleitungs-Lkw für lange Tagesrouten mit hohem Energiebedarf sein. Die komplementären Technologiekonfigurationen sind also durch spezifische Anwendungsparameter (Reichweite, Energiezufuhr etc.) definiert.

Als Grundlage für die umfassende Bewertung solcher Technologiekombinationen hinsichtlich technischer, ökonomischer, ökologischer, energiesystemischer und politischer Aspekte wurde in einem ersten Schritt eine [Bewertungsmatrix](#) erstellt, die im weiteren Projektverlauf angewendet wird. Im vorliegenden Papier wird diese Bewertungsmatrix für ein Screening der verschiedenen Technologiekonfigurationen verwendet, um sinnvolle Kombinationen für die weitere Modellierung abzuleiten. Die Ergebnisse dieses Screenings

¹ Mit „Lkw“ sind in diesem Dokument auch Sattelzüge gemeint. Der Fokus liegt bei der Bewertung auf Lkw > 26 t (siehe Einführung zu Kapitel 4).

werden im Folgenden anhand der einzelnen Bewertungskriterien erläutert. Die Leitfragen dabei sind:

- Wo hat die Basis-Technologiekonfiguration „batterieelektrische Fahrzeuge + stationäre Ladeinfrastruktur“ ihre Schwachstellen?
- In welchem Maß wird die klimafreundliche Transformation des Straßengüterverkehrs durch diese Schwachstellen gehemmt?
- Welche Komplementärtechnologien können diesen Schwachstellen/Restriktionen (im Hochlauf) zielgerichtet entgegenwirken?

2 Technologiekonfigurationen

Im Screening mithilfe der Bewertungsmatrix werden folgende Technologiekonfigurationen betrachtet:

- **BEV/LIS:** In diesem Screening bilden batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) in Kombination mit stationärer Ladeinfrastruktur (LIS) die Basis-Technologiekonfiguration, die mit den anderen Komplementärtechnologien verglichen wird. Typische Reichweiten bei einem Fahrzeug > 26 t liegen im Verteilerverkehr bei 200 km und im Fernverkehr bei 400 km.
- **ERS/OL bzw. Schiene, Induktion:** Bei den elektrischen Straßensystemen (ERS) werden BEV, die elektrisch an der Oberleitung (bzw. auf der Stromschiene/induktiv) laden und fahren, betrachtet. In der Regel besteht zusätzlich die Möglichkeit des stationären Ladens im Depot. Typische Reichweiten der Batterie bei einem Fahrzeug > 26 t liegen unabhängig von der Einteilung in Verteiler-/Fernverkehr bei etwa 100 km, sind also für die Zubringer zu ERS ausgelegt.
- **BWS:** Beim Batteriewechselsystem werden BEV mit Wechselbatterie betrachtet, die an öffentlichen Batteriewechselstationen automatisch getauscht werden. Die Möglichkeit des stationären Ladens im Depot wird berücksichtigt, aber es wird angenommen, dass perspektivisch keine MCS-Kompatibilität für das öffentliche Laden besteht, da dies höhere zusätzliche Kosten darstellen würde und in Kombination mit Wechselbatterien daher unwahrscheinlich ist. Ein Anwendungsfeld ist der Fernverkehr, da die Kostenersparnis über viele Kilometer größer ist und damit eine bessere Wirtschaftlichkeit als im Verteilerverkehr erzielt werden kann. BWS können aber auch als Alternative zum Depotladen bei Flächen- und Netzanschluss-Limitierungen zum Einsatz kommen und sind daher ebenfalls im Verteilerverkehr denkbar. Typische Reichweiten bei einem Fahrzeug > 26 t liegen analog zum BEV mit stationärer LIS im Verteilerverkehr bei 200 km und im Fernverkehr bei 400 km.
- **E-Trailer:** Hierbei handelt es sich um Sattelaufleger mit einer elektrischen Antriebsachse und eigener Traktionsbatterie. Bei BEV mit E-Trailern als Range-Extender (REX) kann sowohl das Fahrzeug als auch der Sattelaufleger stationär geladen werden. In einer Übergangszeit wird der E-Trailer auch in Kombination mit einer Diesel-Sattelzugmaschine berücksichtigt. Die REX-Option mit einer H₂-Brennstoffzelle wird nicht betrachtet, da auf diese Weise zwei teure Systeme (große Batterie und Brennstoffzelle) kombiniert würden und dies aufgrund der hohen Kosten unwahrscheinlich ist.
- **H₂-FCEV:** Bei den Wasserstoff-basierten Technologien werden zum einen H₂-Brennstoffzellenfahrzeuge (H₂-FCEV) mit elektrischem Motor betrachtet, die an öffentlichen H₂-Tankstellen tanken.
- **H₂-ICEV:** Zum anderen werden auch H₂-Verbrennerfahrzeuge (H₂-ICEV) zum Vergleich herangezogen, die ebenfalls an öffentlichen H₂-Tankstellen tanken.

Die Prämisse bei der Aufstellung dieser Liste ist, dass die klimafreundliche Transformation des Schwerlastverkehrs mit elektrischen Antrieben bewerkstelligt wird. Eine Ausnahme im Rahmen dieses Screenings bildet dabei der H₂-ICEV.

3 Bewertungsmatrix

Zur Bewertung denkbarer Kombinationen verschiedener Energieversorgungstechnologien für Lkw dient die nachfolgende Matrix (siehe Tabelle 1), die in einem separaten Papier ausführlich dokumentiert ist (Heining et al. 2024). Grundsätzlich bedeutsame Dimensionen der Technologiebewertung lassen sich in verschiedene Cluster ordnen, die die einzelnen Kriterien zusammenfassen. Für jedes Kriterium wurde zusätzlich die zeitliche Relevanz eingeschätzt, die ausdrücken soll, in welchem Zeithorizont das jeweilige Kriterium von besonderer Bedeutung für die Technologiebewertung ist.

Tabelle 1: Kriterien zur Technologiebewertung mit zeitlicher Relevanz (X: Sehr relevant, (X): Eher relevant)

Cluster	Kriterium	Zeitliche Relevanz	
		2030	2045
Technologie	Technologische Reife	X	
	Verfügbarkeit von Standards	X	
Nutzung	Nutzerakzeptanz	X	
	Operationeller Anpassungsbedarf	X	(X)
Wirtschaftlichkeit	Fahrzeugkosten	X	X
	Zu erwartende Energiekosten	X	X
Energiesystem	Beitrag zur Stabilität des Energiesystems	(X)	X
	Potenzielle Flexibilität der Lastkurve	(X)	X
	Netzintegration	X	X
Infrastrukturaufbau	Bedarf an Infrastrukturaufbau	X	X
	Investitionsvolumen	X	
	Ausbaugeschwindigkeit	X	
	Flächenbedarf	X	X
Kritikalität	Bedarf an kritischen Rohstoffen	(X)	X
Politik	Entscheidungsnotwendigkeit der Politik	X	

Darüber hinaus gibt es einige Synthesekriterien, die sich zusammenfassend aus mehreren anderen Kriterien ergeben und übergeordnete Aspekte beschreiben (→ Tabelle 2).

Tabelle 2: Synthesekriterien mit zeitlicher Relevanz

Synthesekriterien	Kriterium	Zeitliche Relevanz	
		2030	2045
	A. Geschwindigkeit von Antriebswende und Emissionsminderung	X	
	B. Langfristiger Beitrag zur Klimaneutralität		X
	C. Risiken durch Pfadabhängigkeiten	X	X

4 Bewertung der Technologiekonfigurationen

Im Folgenden werden die Technologiekonfigurationen für jedes Bewertungskriterium hinsichtlich ihres Risikos, die klimafreundliche Transformation des Straßengüterverkehrs zu hemmen, eingeordnet. Insbesondere sollen dabei die Schwachstellen der Basis-Technologiekonfiguration der BEV mit stationärer Ladeinfrastruktur (LIS) identifiziert werden. Gleichzeitig werden geeignete komplementäre Technologiekonfigurationen mit dem Potenzial, den entsprechenden Risiken entgegenzuwirken, herausgearbeitet.

Das Screening dient der Eingrenzung relevanter Kombinationen von Technologiekonfigurationen für die weitere Modellierung, in der die Synergien der Komplementärtechnologien im weiteren Projektverlauf detailliert analysiert werden sollen. Im Screening wird zunächst das mittelfristige Potenzial hinsichtlich der einzelnen Bewertungskriterien eingeschätzt. Der Fokus liegt also auf dem Zeitraum bis 2030 mit einzelnen Ausblicken Richtung 2045. Die Einordnung geschieht hauptsächlich mit Blick auf die Fahrzeugklasse > 26 t, da diese den größten Anteil (59 %) an den THG-Emissionen des schweren Straßengüterverkehrs hat (Allekotte et al. 2024). Bei einigen Kriterien muss zwischen den Anwendungsfällen des Verteiler- und Fernverkehrs unterschieden werden. Teilweise werden zudem Fahrzeug und Infrastruktur einer Technologiekonfiguration separat bewertet.

In dieser Bewertung werden die einzelnen Technologiekonfigurationen isoliert betrachtet, jedoch immer unter der Prämisse, dass diese in Kombination mit anderen Technologiekonfigurationen auftreten werden. Die Basis-Technologiekonfiguration, die stets als gegeben angenommen wird, sind BEV mit stationärer Ladung.

Die Einordnung der Technologiekonfigurationen auf den Farbskalen der einzelnen Bewertungskriterien sind hinsichtlich der Zielerreichung der nachhaltigen Transformation des Straßengüterverkehrs folgendermaßen zu verstehen:

- Grün = niedriges Risiko/geringe Hürden bzw. Restriktionen/wenig Aufwand
- Rot = hohes Risiko/große Hürden bzw. Restriktionen/hoher Aufwand

Sowohl bei der Entwicklung der [Bewertungsmatrix](#) als auch im Zuge ihrer Anwendung auf die Technologiekonfigurationen wurde je ein Expert*innenworkshop abgehalten, um zusätzliche Argumente und Perspektiven einzuholen. Unser herzlicher Dank geht an die Teilnehmenden dieser Workshops.

4.1 Technologie: Technologische Reife und Standardisierung

Im Bereich *Technologie* wurden die technologische Reife und die Verfügbarkeit von Standards als zentrale Kriterien identifiziert. Leitfragen sind hier der Erprobungsgrad der Technologie und die Existenz von Normen oder Spezifikationen für systemkritische Komponenten, Prozesse bzw. Schnittstellen.

CLUSTER: TECHNOLOGIE	
Kriterium: Technologische Reife	
<p>Motivation</p> <p>Die technologische Reife ist ein entscheidender Faktor, um den Entwicklungsstand, die Funktionstüchtigkeit und die Ausrollfähigkeit einer Technologie zu beurteilen. Dabei sind insbesondere Sicherheit, Erprobungsgrad, Standardisierung, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Gesamtsystems von Bedeutung. Darüber hinaus bildet sie die Grundlage zur Einschätzung der Marktreife entsprechender Systeme und ihrer Komponenten.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Wie hoch ist die technologische Reife und welchen Erprobungsgrad weisen die Technologien auf?</p>
Kriterium: Verfügbarkeit von Standards	
<p>Motivation</p> <p>Standards vereinfachen Technologieentwicklung und ermöglichen eine sichere und schnelle Einführung neuer Technologien sowie Interoperabilität.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Existieren Normen oder Spezifikationen für systemkritische Komponenten, Prozesse bzw. Schnittstellen und sind diese diskriminierungsfrei implementierbar?</p>

Hinsichtlich der technologischen Reife und der Standardisierung begegnet die Basis-Technologiekonfiguration der BEV mit stationärer LIS keinen großen Hürden. Das Technology Readiness Level¹ (TRL) liegt für **BEV** im Verteilerverkehr bei 9 und auch im Fernverkehr bei

¹ Auf Deutsch: Technologie-Reifegrad, Skala von 1 (erstes Konzept) bis 11 (Nachweis der endgültigen Stabilität) wie in (ITF 2023)

8/9 (ITF 2023). Es gibt bereits eine Vielzahl an BEV-Modellen in verschiedenen Größenklassen und Ausführungen (Batteriekapazität etc.) am Markt (ifeu 2024), die vermehrt in Flotten zum Einsatz kommen (electrive.net 2024a). Bei der entsprechenden Infrastruktur des stationären Ladens muss man zwischen dem Combined Charging System (CCS) und dem Megawatt Charging System unterscheiden. Mit dem **CCS** mit Ladeleistungen von aktuell bis zu 350 kW (TRL 8 (ITF 2023)) wurde im Pkw-Bereich schon viel Erfahrung gesammelt. Im Lkw-Bereich werden CCS-Ladesäulen bereits in Depots und nun vereinzelt auch an öffentlichen Ladestandorten (electrive.net 2024b) eingesetzt. Beim **MCS** (TRL 6/7 (ITF 2023)) mit Ladeleistungen über 1 MW wird die kommerzielle Markteinführung unter anderem noch von der ausstehenden Finalisierung des Standards gehemmt. Der Stecker-Standard wird jedoch bereits für Ende 2024 erwartet; der finale Standard für MCS dann für Mitte 2025 (Zeyen 2024).

Elektrische Lkw, die an einer **Oberleitung** (OL) Strom beziehen, werden seit mehreren Jahren in Feldversuchen (davon drei in Deutschland seit 2019 (Gnann et al. 2023)) erprobt. In den Feldversuchen wurde nachgewiesen, dass die Technologie unter Realbedingungen zuverlässig einsetzbar ist und insbesondere infrastrukturseitig eine hohe technologische Reife aufweist (Werner et al. 2024). Weitere Untersuchungen bestätigen ein geringes technologisches Risiko (TRL 8 (ITF 2023)). Bezüglich der Standardisierung profitiert die Technologie zudem von der etablierten Anwendung bei der Bahn (Stephan und Werner 2024). Fahrzeugseitig besteht allerdings noch Optimierungsbedarf. In den Feldversuchen ist bisher eine geringe zweistellige Anzahl von OL-Lkw von einem Hersteller auf den deutschen Straßen in Betrieb. Ein Ausrollen der Technologie wie bei den BEV mit stationärer LIS ist bisher nicht zu beobachten, was auch auf die Abhängigkeit der Infrastruktur von einer zentralen, politischen Pfadentscheidung und der damit verbundenen Unsicherheit zurückgeführt werden kann (Gnann et al. 2023). Dennoch bekunden weitere Fahrzeughersteller Interesse an der Technologie und sind in laufende Oberleitungs-Projekte (z.B. BEE) eingebunden (BEE 2023).

Die anderen beiden elektrischen Straßensysteme (Electric Road Systems = ERS) basierend auf einer **Stromschiene** bzw. **Induktion** weisen eine geringere technologische Reife auf (TRL 4/5 (ITF 2023)). Für Straßenbahnanwendungen existieren zwar fahrbahnintegrierte Stromschiensysteme mit hoher technologischer Reife im regulären Betrieb und die Induktion hat einen hohen Erprobungsgrad in der stationären Anwendung. Inwieweit sich die Eignung und Praxistauglichkeit auf Anwendungen im (dynamischen) Schwerlastverkehr übertragen lassen, ist allerdings noch zu prüfen. Bisher gibt es lediglich kurze Teststrecken in den europäischen Nachbarländern Frankreich und Schweden (Duprat 2023; Electreon 2024a). In Deutschland wurde zudem in 2023 eine Teststrecke in Balingen (ELINA-Projekt) in Betrieb genommen (Electreon 2024b). Eine weitere Teststrecke entlang eines Autobahnabschnitts soll noch in 2024 im Vorhaben E | MPOWER eröffnet werden (Electreon 2024c).

Beim Thema **Wasserstoff** (H₂) sind zwei Fahrzeugarten zu unterscheiden, die sich die gleiche Infrastruktur (H₂-Tankstellen) teilen: H₂-Brennstoffzellenfahrzeuge (H₂-FCEV) und H₂-Verbrenner (H₂-ICEV). H₂-FCEV wird ein TRL von 8/9 zugeschrieben, während H₂-ICEV nur ein TRL von 6 aufweisen (ITF 2023). Öffentliche H₂-Tankstellen sind in Europa zwar bereits verfügbar (H2.LIVE 2024), jedoch sind diese vor allem für Pkw, leichte Nutzfahrzeuge und Busse ausgelegt, sodass dieser Infrastruktur ein TRL von 4 zugeschrieben wird (ITF 2023). Lkw benötigen höhere Durchflussraten und tanken heute überwiegend mit einem anderen Druckniveau (350 bar statt 700 bar für Pkw) (H2 MOBILITY 2021). Das offizielle Betankungsprotokoll für schwere Nutzfahrzeuge (SNF) ist noch in der Entwicklung (e-mobil BW GmbH 2023; ISO 2024): Die Übertragung von Pkw-Standards auf Lkw ist zum Teil noch ausstehend und sicherheitsrelevante Normen (Explosionsschutz etc.) sind noch auszuarbeiten. Zudem

bestehen bisher Unsicherheiten, welcher Wasserstoff (grün, blau) in welcher Form (gasförmig, flüssig) für Lkw bereitstehen wird, woher dieser kommt (Import, zentrale/dezentrale Elektrolyse) und wie er angeliefert wird (Anlieferung mit Lkw, Pipeline).

Batteriewechselsysteme (BWS) werden in China bereits in großangelegten Pilotprojekten in ganzen Städten eingesetzt, allerdings hier mit dem Fokus auf den Verteilerverkehr (Cui et al. 2023). Das TRL wird daher bereits auf 8/9 geschätzt (ITF 2023). In Deutschland existiert hingegen nur das Pilotprojekt eHaul mit einer ersten Wechselstation (Kilian 2023b) und das darauf aufbauende Forschungsprojekt UniSwapHD (TU Berlin 2024). Der Fernverkehr wird in diesen Projekten als zusätzlich möglicher Anwendungsfall gesehen. Eine große Hürde stellt die Standardisierung der Wechselbatterien dar. Aktuell unterscheiden sich die eingesetzten Batterien und deren Platzierung im Fahrzeug bei den verschiedenen Lkw-Herstellern zum Teil deutlich (Belingardi und Scattina 2023; Schaal 2022). Die Einigung auf einen Batteriestandard ist daher noch nicht absehbar. Mit zunehmendem Anteil chinesischer Lkw-Modelle auf dem europäischen Markt bzw. Hersteller-eigenen Lösungen sind BWS als Komplementärtechnologie zum BEV mit stationärer LIS dennoch denkbar.

E-Trailer haben wiederum kein Standardisierungsproblem, da Sattelaufleger bereits genormt sind und die Kompatibilität mit Sattelzugmaschinen daher gegeben ist. Bisher verfolgen jedoch nur einzelne Hersteller diese Technologie (Trailer Dynamics 2024; ZF 2024). E-Trailer können zum einen als Range-Extender (REX) für BEV oder in einer Übergangszeit zunächst auch in Kombination mit Sattelzugmaschinen mit Verbrennungsmotoren eingesetzt werden. Beide Anwendungsfälle wurden bereits in einzelnen Feldtests erprobt (Wertzke 2023).

4.2 Nutzung: Nutzerakzeptanz und operationeller Anpassungsbedarf

Die Bewertung im Bereich *Nutzung* konzentriert sich auf die Akzeptanz der Lkw-Betreiber und den operationellen Anpassungsbedarf der verschiedenen Technologiekonfigurationen. Letzterer wirkt sich dabei auf die Akzeptanz aus.

CLUSTER: NUTZUNG	
Kriterium: Nutzerakzeptanz	
<p>Motivation</p> <p>Akzeptanz der Lkw-Betreiber ist für einen schnellen Markthochlauf der Technologien wichtig.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Was sind die Erwartungen von Lkw-Betreibern an den Umstieg auf die jeweilige Technologiekonfiguration? Wie hoch sind Bereitschaft und Skepsis für den Umstieg?</p>
<p>Niedriges Risiko</p>	<p>H₂-ICEV BEV/LIS BWS E-Trailer H₂-FCEV ERS</p> <p>Hohes Risiko</p>

Kriterium: Operationeller Anpassungsbedarf	
<p>Motivation</p> <p>Je umfassender die Änderungen in den Abläufen durch die neue Technologie sind, desto größere operationelle Herausforderungen können beim Umstieg entstehen. Diese beeinflussen dann auch die Akzeptanz der Technologie.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>In welcher Art und in welchem Ausmaß besteht durch die neue Technologie Anpassungsbedarf bei Logistikabläufen?</p>

Der beginnende Markthochlauf der Basis-Technologiekonfiguration der BEV mit mittlerweile über 4.600 mittleren (N2) und 700 schweren (N3) Elektro-Nutzfahrzeuge in Deutschland (KBA 2024) spricht für eine hinreichende Akzeptanz gegenüber dieser Technologie zumindest im Verteilerverkehr. Im Fernverkehr herrscht bei den Betreibern jedoch teilweise noch Skepsis bezüglich der ausreichenden Gewährleistung von Zwischenladungsmöglichkeiten (Göckeler et al. 2022; Jöhrens 2022). Die Einführung des MCS könnte dieser Skepsis und dem zugrundeliegenden Anpassungsbedarf (längere Standzeiten) entgegenwirken, jedoch gibt es auch hier noch Bedenken bezüglich der Ladedauer sowie ausreichender Netzanschlüsse und Parkplätze (Salomon 2024). Zudem muss die Ladesäulenverfügbarkeit bei sich ständig ändernden Verkehrsbedingungen sichergestellt sein, damit logistische Abläufe nicht beeinträchtigt werden. Die Ausschreibung des initialen Lkw-Ladernetzes und die Beauftragung der benötigten Netzanschlüsse durch den Bund (NLL 2024a; b) könnten diese Vorbehalte reduzieren.

Neben dem Risiko der längeren Standzeiten stellen Nutzlasteinbußen aufgrund des Batteriegewichts von BEV einen operationellen Anpassungsbedarf dar. Diese Nutzlasteinbußen werden jedoch regulatorisch ausgeglichen: Seit 2019 dürfen emissionsfreie Lkw zwei Tonnen mehr als das gesetzlich vorgeschriebene zulässige Gesamtgewicht wiegen (Verordnung (EU) 2019/1242). Unter diese Regelung fallen neben den BEV also auch die FCEV, die damit das Gewicht der Brennstoffzellensysteme kompensieren können. Eine Erhöhung der Ausnahme bezüglich Gewicht und Länge der E-Lkw ist zudem in Planung (Pressemitteilung EP 2024). Steigende Energiedichten im Zuge der weiteren Batterieentwicklung führen zudem zu geringeren Mehrgewichten von BEV, wenn dies nicht durch höhere benötigte Reichweiten aufgehoben wird.

ERS-Fahrzeuge haben aufgrund der dynamischen Stromzufuhr während der Fahrt den Vorteil, eine kleinere Batterie zu benötigen, und haben daher geringere Nutzlasteinbußen gegenüber einem BEV mit vergleichbarer Reichweite. Zudem entfallen potenziell nötige zusätzliche Standzeiten außerhalb der verpflichtenden Pausenzeiten für die Zwischenladung, was aus logistischer Perspektive einen maßgeblichen Vorteil bedeutet. Die Flexibilität durch das dynamische Laden während der Fahrt wurde in Feldtests mit der Oberleitung von den teilnehmenden Transportunternehmen positiv hervorgehoben (ELISA 2022; Salomon 2024). Einschränkungen bei der Flexibilität bestehen hingegen aufgrund der durch das ERS-Netz definierten Routen, auf denen ERS-Fahrzeuge eingesetzt werden können.

Neben der Zuverlässigkeit und Praxistauglichkeit des Fahrzeugs sind die Gesamtbetriebskosten (TCO – total cost of ownership) und politischen Rahmenbedingungen laut Umfragen von 2022 entscheidend für die Technologiewahl (Göckeler et al. 2022; Jöhrens 2022). Falls die Infrastrukturkosten für ein Oberleitungsnetz zu einer höheren Infrastrukturumlage für die Betreiber von O-BEV im Vergleich zu BEV mit stationärer Ladung führen (Jöhrens et al. 2023), wirkt sich dies nachteilig auf die Bereitschaft für den Umstieg auf O-BEV aus. Zudem herrscht Skepsis gegenüber ERS aufgrund der Abhängigkeit von staatlicher Planung des Kernnetzes (Mottschall et al. 2023). Akzeptanzprobleme bezüglich ERS sind also nicht notwendigerweise auf Anpassungsbedarfe in den logistischen Abläufen zurückzuführen, sondern insbesondere auf mangelndes Vertrauen in politische Pfadentscheidung. Die ERS-Konzepte der Stromschiene und Induktion sind dabei ähnlich zu bewerten wie die Oberleitung.

Laut einer Umfrage von 2022 (Jöhrens 2022) müssen **H₂**-Lkw deutlich höhere Reichweiten als BEV aufweisen, um betriebliche Vorteile gegenüber BEV zu bieten. Dies ist aus Gründen des Bauraums allerdings nur bei Nutzung flüssigen Wasserstoffs zu erwarten, bei dem die technische und infrastrukturelle Entwicklung noch deutlich weniger weit vorangeschritten ist als beim gasförmigen Wasserstoff. Zudem herrscht keine Bereitschaft, für betriebliche Vorteile wie das Wegfallende Zwischenladen deutlich höhere Vollkosten in Kauf zu nehmen (Jöhrens 2022). Aufgrund der höheren Fahrzeug- und Energiekosten (Jöhrens et al. 2022) stellt dies eine Hürde für die Marktakzeptanz von **H₂-FCEV** dar. Um das Risiko für Lkw-Betreiber zu senken und die Nutzerakzeptanz in der Einführungsphase zu erhöhen, werden bereits Pay-per-use-Modelle mit fixen Kilometerpauschalen angeboten (e-mobil BW GmbH 2023).

H₂-ICEV sind operationell sehr nah am Diesel-Lkw, was für eine hohe Akzeptanz spricht. Die Betankungszeit für H₂-Lkw (H₂-FCEV und H₂-ICEV) soll theoretisch bei 10 bis 15 Minuten liegen (e-mobil BW GmbH 2023), jedoch wäre je nach H₂-Vorkühlung und Sicherheitsmarge in den Betankungsprotokollen eher mit Tankzeiten bis zu 20-30 Minuten zu rechnen (Greisel und Gebhard 2022). Eine Tankdauer von ca. 30 Minuten ist derzeit auch in der Praxis zu beobachten (Nieß 2024). Solche Zeiten würden mit MCS ebenfalls eine relevante Nachladung von BEV erlauben. Da die schnelle Betankung ein zentraler Aspekt für die Akzeptanz des Wasserstoffs als Kraftstoffoption ist (e-mobil BW GmbH 2023), könnten solche längeren Betankungszeiten, u.a. aufgrund des noch ausstehenden Betankungsprotokolls für Lkw (siehe Abschnitt 4.1), den zentralen Vorteil aushebeln und sich negativ auf die Akzeptanz von H₂-ICEV auswirken. Wie bei den H₂-FCEV hat der hohe Wasserstoffpreis ebenfalls negative Auswirkungen auf die Akzeptanz der H₂-ICEV.

Die **BWS** haben gegenüber der Basis-Technologiekonfiguration den Vorteil der Zeiteinsparung beim Batteriewechsel im Vergleich zum stationären Laden. Die daher erwartete hohe Flexibilität insbesondere auch auf Langstrecken wird von Lkw-Betreibern positiv hervorgehoben (Noto und Mostofi 2023). Die Sorge um eine ausreichende Abdeckung mit Wechselstationen (Noto und Mostofi 2023) und die Skepsis bezüglich der Durchsetzung eines einheitlichen Batteriestandards schwächen hingegen die Akzeptanz von BWS, auch wenn einige Akteure aus der Fahrzeugherstellung und Energiebereitstellung bereits Interesse an dieser Technologie bekundet haben (Kilian 2023a; Werwitzke 2024b).

Da **E-Trailer** in Kombination mit Diesel-Sattelzugmaschinen zunächst als vergleichsweise niederschwellige Übergangslösung nutzbar sind, dürfte eine größere Akzeptanz als bei den BEV zu erwarten sein. In Kombination mit BEV-Sattelzugmaschinen fallen allerdings zusätzliche Kostenaufwände und Nutzlasteinbußen aufgrund der zusätzlichen Batterie des E-Trailers an (elektro-trailer-foerderung.de 2024), was die Akzeptanz in diesem Fall senken

dürfte. Zudem müssen die E-Trailer ebenfalls während einer längeren Standzeit geladen werden. Dies kann jedoch im Depot oder an der Rampe erfolgen, da der E-Trailer als REX fungiert und somit längere Ladestopps von BEV im Fernverkehr vermeiden könnte.

Übergreifend wird erwartet, dass **E-Lkw** selbst in Zukunft ähnlich zuverlässig sind wie Diesel-Lkw und darüber hinaus den Vorteil geringerer Wartungsaufwände haben (Noto und Mostofi 2023). Aus Berichten der ersten E-Lkw-Einsätze in der Praxis geht zudem hervor, dass das Fahrgefühl von den Fahrer*innen sehr geschätzt wird (Dietze 2024; Ryan 2024), was sich insbesondere in Hinblick auf den zunehmenden Fahrer*innenmangel (IRU 2024) positiv auf die Akzeptanz auswirkt. Bezüglich der Bewertung des operationellen Anpassungsbedarfs ist zudem anzumerken, dass im Zuge der weiteren **Automatisierung**, die unter anderem durch den Fahrer*innenmangel motiviert ist, ohnehin mit angepassten Betriebsabläufen in der Logistik zu rechnen ist (Fraunhofer IVI 2024; Hoberg 2022).

4.3 Wirtschaftlichkeit: Fahrzeug- und Energiekosten

Im Bereich *Wirtschaftlichkeit* werden wesentliche Bestandteile der TCO bewertet, wobei die Fahrzeug- und Energiekosten getrennt betrachtet werden. Die Untersuchung der Fahrzeugkosten konzentriert sich dabei auf die Anschaffungskosten. Die Betrachtung der Energiekosten beschränkt sich auf die Großhandelspreise.

CLUSTER: WIRTSCHAFTLICHKEIT	
Kriterium: Fahrzeugkosten	
<p>Motivation</p> <p>Die nutzerseitige Wirtschaftlichkeit der Fahrzeuge ist eine wesentliche Voraussetzung für einen Technologiehochlauf. Dabei spielen neben den Energiekosten die Anschaffungskosten eine wesentliche Rolle und liegen bei allen Technologiekonfigurationen in der Regel höher als bei heutigen Diesel-Lkw. Die Betriebs- und Instandhaltungskosten der Fahrzeuge (ohne Energiekosten) haben im Vergleich zu den Anschaffungskosten bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen eine geringere Bedeutung.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Welche Kosten fallen für die Fahrzeuganschaffung auf Nutzerseite an?</p>

Kriterium: Zu erwartende Energiekosten	
<p>Motivation</p> <p>Die Energiekosten sind neben den Anschaffungskosten ein wesentlicher Teil der TCO von Lkw und somit ein wichtiger Faktor für die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugbetriebs.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Die Großhandels-Preisbestandteile des Ladestroms hängen davon ab, in welchen Stunden welche Menge an Ladestrom bezogen wird, und damit von der Lastkurve. Welche Unterschiede bestehen also zwischen den Technologien mit Fokus auf Großhandels-Preisbestandteile?</p>

Die **Anschaffungskosten** für Fahrzeuge mit alternativen Antriebstechnologien sind in der Einführungsphase deutlich höher als die für herkömmliche Diesel-Lkw. Mit dem Markthochlauf wird jedoch bereits bis 2030 eine Kostendegression erwartet, die sich bei den verschiedenen Technologien unterscheiden kann. BEV nehmen bei den prognostizierten Absatzzahlen laut Herstellerangaben (NOW GmbH 2023a) bis 2030 einen bedeutend größeren Anteil ein als H₂-FCEV (in 2030: BEV knapp 58 %, H₂-FCEV ca. 17 %). Es ist also eine höhere Kostendegression bis 2030 für **BEV** als für **H₂-FCEV** wahrscheinlich, was auch von den aktuell stark fallenden Batteriepreisen (BloombergNEF 2023) gestützt wird. Für die Brennstoffzellen wird gleichwohl ebenfalls eine relevante Kostendegression erwartet (Link et al. 2024). Für die TCO entscheidend sind bei dem Vergleich zwischen BEV und H₂-FCEV jedoch ohnehin die Energiekosten (siehe unten), die beim H₂-FCEV einen höheren Anteil an den Gesamtkosten haben als beim BEV (Jöhrens et al. 2023; Link et al. 2024).

Die anderen mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeuge, die **H₂-ICEV**, sind in ihren Anschaffungskosten insbesondere vor 2030 erheblich günstiger zu erwarten als H₂-FCEV, da die Erfahrungen mit dem konventionellen Verbrennungsmotor teilweise übertragbar sind. Nach 2030 gleichen sich die Fahrzeugpreise der beiden Wasserstofftechnologien jedoch wahrscheinlich an (e-mobil BW 2021). Die Betriebs- und Instandhaltungskosten (ohne Energiekosten) der H₂-ICEV liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie beim Dieselantrieb, während bei BEV und H₂-FCEV in etwa ein Drittel geringere Kosten als bei der Dieselreferenz erwartet werden (e-mobil BW 2021).

Im Vergleich zum BEV haben **ERS**-Fahrzeuge dank der Option des dynamischen Ladens deutlich kleinere Batterien, die lediglich für die verbleibenden Zubringerstrecken ohne ERS-Abdeckung ausgelegt sind. Da die Batterie hauptverantwortlich für die Mehrkosten von BEV gegenüber Diesel-Fahrzeugen ist, haben ERS-Fahrzeuge im Vergleich zu BEV, die auf stationäre LIS angewiesen sind, einen deutlichen Kostenvorteil in der Anschaffung.

Bei den Fahrzeugen mit **Wechselbatterie** entfallen die Batteriekosten bei der isolierten Betrachtung der Anschaffungskosten vollständig, sodass die Fahrzeugpreise bedeutend niedriger sind als bei BEV mit festverbauter Batterie. In den Betriebskosten tauchen die Batteriekosten jedoch als Nutzungsumlage wieder auf, da die Wechselbatterien voraussichtlich als Mietlösung angeboten werden.

In der Kombination mit bestehenden Diesel-Sattelzugmaschinen ist die Beschaffung eines **E-Trailers** günstiger als ein BEV. Da diese Kombination jedoch nur eine kurzfristige Übergangslösung auf dem Weg zu einem THG-neutralen Straßengüterverkehr darstellt, muss perspektivisch der zusätzliche Kostenaufwand zum BEV betrachtet werden. Bei E-Trailern fallen im Vergleich zu herkömmlichen Sattelaufliegern höhere Anschaffungskosten aufgrund der zusätzlich verbauten Komponenten wie Batterie und E-Antrieb an (elektro-trailer-foerderung.de 2024). Wegen des zusätzlichen technischen Aufwands können diese Mehrkosten durch eine entsprechend kleinere Batterie der BEV-Sattelzugmaschine voraussichtlich nicht ausgeglichen werden.

Bei den zu erwartenden **Energiekosten** liegt der Fokus auf den Großhandelspreisen des verwendeten Stroms. Andere Preisbestandteile wie Steuern oder Netzentgelte sowie möglicherweise auf den Strompreis umgelegte Kosten der Ladeinfrastruktur werden hier nicht berücksichtigt. Die untersuchten Optionen gliedern sich in zwei Gruppen: direkt-elektrische Antriebsoptionen mit relativ günstigen Energiekosten und Wasserstoff-basierte Optionen mit deutlich höheren Energiekosten.

Unter den direkt-elektrischen Optionen gibt es nur geringe Unterschiede, wobei **BEV** ungefähr im Mittelfeld liegen. Hier hängen die Großhandels-Strompreise von der realisierten Flexibilität des Strombezugs ab. Bei sehr flexiblem Laden, was vor allem im Depot bei längeren Standzeiten möglich ist, könnten niedrige Ladestrompreise realisiert werden, die sogar unter den heutigen Großhandelspreisen liegen (Gaete-Morales et al. 2024). Falls eine Rückspeisung ins Netz möglich ist, die Lkw-Batterien also als verteilte Netzspeicher dienen, wären Zusatzerlöse möglich, die die Energiekosten weiter senken. **ERS** dürften dagegen etwas höhere Ladestrompreise haben, da ihre im Vergleich zu BEV kleineren Batterien die Verlagerung des Strombezugs in besonders günstige Stunden erschweren. Auch ihr Potenzial zur Generierung von Zusatzerlösen durch Rückspeisung ist geringer. **BWS** dürften sehr ähnliche Energiekosten aufweisen wie BEV, möglicherweise mit einem kleinen Vorteil durch einen flexibleren Netzstrombezug der Batteriewechselstationen gegenüber BEV-Schnellladern. **E-Trailer** dürften die geringsten Energiekosten haben, da sie annahmegoß nur im Depot geladen werden und die tendenziell teurere Schnellladung entfällt.

Alternativ ist die Eigenerzeugung von PV-Strom, beispielsweise auf Dächern von Depots, möglich. Selbst verbrauchter PV-Strom ist in Hinblick auf Steuern, Abgaben und Netzentgelte gegenüber dem Netzstrombezug stark privilegiert. Dadurch bietet die PV-Eigenerzeugung ein erhebliches Potenzial zur Reduktion der Energiekosten für direktelektrische Antriebe¹, wenn nicht nur Großhandelspreise, sondern auch andere Netzstrompreisbestandteile berücksichtigt werden. Dies soll im weiteren Projektverlauf untersucht werden.

H₂-FCEV kommen aufgrund hoher Wandlungsverluste der Produktion, des Transports und der Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen auf deutlich höhere Energiekosten. Noch höher sind diese bei **H₂-ICEV**, da im Verbrennungsmotor noch größere Wandlungsverluste auftreten.

4.4 Energiesystem: Stabilität, Flexibilität der Lastkurve und Netzintegration

Im Bereich *Energiesystem* wurden für alle Technologien der Beitrag zur Stabilität des Energiesystems und die potenzielle Flexibilität der Lastkurve sowie bei Ladeinfrastruktur für direktelektrische Lkw die Netzintegration als zentrale Bewertungskriterien identifiziert.

¹ Der Strombezug für Elektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff ist aktuell von Stromsteuer und Netzentgelten befreit.

CLUSTER: ENERGIESYSTEM	
Kriterium: Beitrag zur Stabilität des Energiesystems	
<p>Motivation</p> <p>Verschiedene Technologien können sich positiv oder negativ auf unterschiedliche Aspekte der Energiesystemstabilität auswirken. Dies ist für die Wahrung der Versorgungssicherheit von großem Interesse. Dabei wird als Basisannahme von einem nutzerorientierten und nicht energiesystemorientierten Betrieb der Fahrzeuge ausgegangen.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Wie wirken sich verschiedene Antriebstechnologien auf unterschiedliche Aspekte der Energiesystemstabilität aus? Von Interesse sind hier z.B. die vorzuhaltende gesicherte Erzeugungsleistung, extreme Lastgradienten, Verhalten im Fehlerfall, Systemdienstleistungen wie Regelleistung sowie Netzengpässe.</p>
<p>Niedriges Risiko</p>	<p>Hohes Risiko</p>
Kriterium: Potenzielle Flexibilität der Lastkurve	
<p>Motivation</p> <p>Die untersuchten Technologien unterscheiden sich mit Blick auf ihre Potenziale, Strom zeitlich möglichst flexibel aus dem Netz zu beziehen. Wünschenswert ist insbesondere die Verlagerung des Strombezugs in Stunden, in denen es ein großes Angebot fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung gibt.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Welches Potenzial haben verschiedene Technologien, den Strombezug in Stunden zu verlagern, in denen es ein großes Angebot fluktuierender erneuerbarer Stromerzeugung und damit niedrige Großhandels-Strompreise gibt? Dabei ist auch von Interesse, inwiefern sich verschiedene Technologien perspektivisch für eine Rückspeisung ins Netz eignen (Vehicle-to-Grid).</p>
<p>Niedriges Risiko</p>	<p>Hohes Risiko</p>
Kriterium: Netzintegration	
<p>Motivation</p> <p>Für einen Technologie-Rollout ist es essentiell, dass die vorgelagerten Energienetzstrukturen auf Verteilnetzebene (Mittel- und Hochspannung) die verkehrlichen Leistungsanforderungen zuverlässig erfüllen können. Die Integration der Ladeinfrastruktur in die Stromnetze ist dabei aufgrund langer Planungs- und Realisierungszeiträume für den Netzausbau als eine zentrale Herausforderung für den Hochlauf anzusehen.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Wie kann die technische Migration der Ladeinfrastruktur in die vorgelagerten Energienetzstrukturen realisiert werden? Welcher Aufwand ist für die Netzintegration hinsichtlich Netzverstärkungen und Netzausbau zu erwarten? Wodurch ist eine Minderung der erforderlichen Netzanschlussleistung realisierbar?</p>
<p>Niedriges Risiko</p>	<p>Hohes Risiko</p>

Die Kriterien „**Beitrag zur Stabilität des Energiesystems**“ sowie „**Potenzielle Flexibilität der Lastkurve**“ werden im Folgenden aufgrund des engen inhaltlichen Zusammenhangs für die jeweiligen Technologieoptionen gemeinsam betrachtet; danach werden Fragen der Netzintegration separat und vertieft diskutiert.

BEV können bei nicht energiesystemorientierter Ladung, v.a. in Verbindung mit Schnellladung, die Spitzenlasten im Stromsektor deutlich erhöhen. Dies gilt insbesondere lokal an den jeweiligen Netzknoten, wo vor allem in der Mittelspannungsebene auch Netzengpässe entstehen können (weitergehende Fragen der Netzintegration werden weiter unten ausführlich diskutiert). Im Vergleich zu Elektro-Pkw sind bei E-Lkw allerdings aufgrund der vielfältigeren Einsatzprofile keine typischen Feierabend-Ladepicks zu erwarten. BEV-Lkw können darüber hinaus den Bedarf an Regelleistung moderat erhöhen, aber bieten auch Potenziale zur zusätzlichen Bereitstellung von Regelleistung.

Je stärker die BEV-Flotte wächst, desto größer werden grundsätzlich auch die Herausforderungen für die Energiesystemstabilität bei nicht optimierter Ladung. Dass auch in anderen Bereichen des Energiesystems die Elektrifizierung bis 2045 stark steigen dürfte (Elektro-Pkw, Wärmepumpen, grüner Wasserstoff), könnte die Herausforderungen bei der Wahrung der Energiesystemstabilität noch steigern – je nachdem, wie flexibel die anderen Sektorenkopplungs-Technologien betrieben werden.

Allerdings haben BEV auch Potenzial für eine Flexibilisierung ihrer Lastkurve, d.h. für energiesystemorientierte Lastverlagerungen und perspektivisch auch für die Rückspeisung in das Stromnetz (Gaete-Morales et al. 2024). Dies gilt vor allem im Depot sowie ggf. an Umschlagplätzen, sofern es dort die Möglichkeit einer längeren Netzverbindung mit hinreichender Anschlussleistung gibt. Die Erschließung dieser Flexibilitätpotenziale hängt allerdings von der Ausgestaltung diverser Tarifbestandteile und anderen infrastrukturellen und regulatorischen Faktoren ab. Beim Schnellladen gibt es dagegen kaum Flexibilitätpotenziale, sofern diese nicht in Kombination mit zusätzlichen stationären Pufferbatterien erfolgt.

Die Auswirkungen von **ERS** auf die Energiesystemstabilität dürften gegenüber BEV etwas geringer sein. Die auftretenden Spitzenlasten sind wegen des entfallenden Schnellladens vor allem lokal geringer. Auf Mittelspannungsebene sollte es entsprechend auch zu geringen Engpässen kommen, da die ERS-Netzanschlüsse räumlich stärker verteilt sind als die für MCS-Infrastrukturen. Je größer das ERS-Netz, desto vorteilhafter dürften ERS gegenüber BEV mit Schnellladung in Hinblick auf die Energiesystemstabilität abschneiden.

Im Bereich der Regelleistung dürfte es dagegen kaum Unterschiede zu BEV geben. Das Potenzial zur Flexibilisierung der Lastkurve ist bei ERS wiederum etwas geringer als bei BEV, da die Fahrzeugbatterien deutlich kleiner sind. Dieser Faktor dürfte Modellrechnungen zufolge den potenziell positiven Aspekt mehr als aufwiegen, dass auch während der Fahrt durch die bestehende Netzverbindung ein Potenzial zur Lastverlagerung besteht (Gaete-Morales et al. 2024). Das Potenzial zur energiesystemorientierten Rückspeisung von Strom ins Netz ist wegen der kleineren Batterien ebenfalls geringer als bei BEV.

Die Wirkung von **BWS** auf die Energiesystemstabilität ist vergleichbar mit der von ERS, also etwas vorteilhafter als die von BEV. Auch hier dürften die Spitzenlasten geringer sein als bei BEV, da die Schnellladung entfällt. Stattdessen werden Batterien gewechselt, die wiederum vorher mit einem gleichmäßigeren bzw. idealerweise sogar mit einem energiesystemorientierten Netzstrombezugsprofil geladen werden. Dementsprechend sollte es auch

zu geringeren Netzengpässen bzw. geringeren Herausforderungen an den Netzanschlusspunkten kommen. Die Möglichkeiten für eine Flexibilisierung der Ladekurve an Batteriewechselstationen dürften aber begrenzt sein durch die Netzanschlussleistung und die Anzahl der vorgehaltenen Batterien. Im Depot sind die Flexibilitätspotenziale ähnlich wie bei BEV, sofern Batterien gleich groß sind, und auch die Potenziale für eine Rückspeisung ins Stromnetz sind sehr ähnlich.

E-Trailer werden in Hinblick auf die Energiesystemstabilität und die Flexibilität der Lastkurve ähnlich bewertet wie ERS und BWS und leicht besser als BEV. Dies liegt wiederum daran, dass hier kein Schnellladen vorgesehen ist und entsprechende Spitzenlasten an den Schnelllade-Netzanschlusspunkten hier nicht auftreten. Sofern im Depot eine hinreichende Netzanschlussleistung besteht, könnten E-Trailer dort flexibel und idealerweise energiesystemorientiert geladen werden.

H₂-FCEV bringen ein vergleichsweise geringes Risiko für die Stabilität des Energiesystems mit sich. Insbesondere dürfte es kaum zu problematischen Spitzenlasten kommen. Dies gilt zumindest unter der Annahme, dass Wasserstoff im europäischen Stromverbund erzeugt wird und dass Elektrolyseure grundsätzlich flexibel betrieben werden, also orientiert an stündlich schwankenden Großhandels-Strompreissignalen. Dies erscheint aufgrund der Größe von Elektrolyseuren, ihrer hohen technischen Flexibilität und günstigen Wasserstoff-Speichermöglichkeiten als Referenzannahme deutlich plausibler als eine entsprechend flexible Aufladung von BEV. Allerdings würde die Bereitstellung relevanter Mengen von Wasserstoff für Lkw einen hohen zusätzlichen Bedarf erneuerbarer Stromerzeugung mit sich bringen, was andere Herausforderungen beim Ausbau fluktuierender erneuerbarer Energien und ihrer Systemintegration mit sich bringen kann, aber per se die Stabilität des Energiesystems nicht negativ beeinflussen muss (Kirchem und Schill 2023).

In Bezug auf mögliche Stromnetzengpässe erscheinen H₂-FCEV ebenfalls eher unkritisch, sofern die Elektrolyse an geeigneten Knoten im Hochspannungsnetz erfolgt (Hobbie und Lieberwirth 2024). Eine weitere Flexibilisierung der Lastkurve ist bei H₂-FCEV über die Basisannahme einer bereits flexiblen Elektrolyse jedoch nicht möglich. Daher unterscheidet sich die Bewertung von H₂-FCEV zwischen den beiden Kriterien „Stabilität des Energiesystems“ und „Flexibilität der Lastkurve“ auch nicht. Eine Möglichkeit der Rückspeisung gibt es im Gegensatz zu den direktelektrischen Optionen mit Batterien nicht.

H₂-ICEV werden in Hinblick auf die Energiesystemstabilität ähnlich gut bewertet wie H₂-FCEV. Die Risiken sind hier jedoch etwas höher, da die Nutzung von Wasserstoff in Verbrennungsmotoren mit höheren Wandlungsverlusten verbunden ist. Somit muss mehr grüner Wasserstoff erzeugt werden, was wiederum einen erhöhten Ausbau erneuerbarer Energien sowie deren Systemintegration erfordert.

Neben den Kriterien der Stabilität des Energiesystems sowie der Flexibilität der Lastkurve ist die **Netzintegration** ein zentraler Aspekt der Technologiebewertung. Die Netzstrukturen sind regional unterschiedlich stark ausgeprägt, was eine Herausforderung für den Anschluss von elektrischen Energieversorgungsanlagen entlang der Autobahnen darstellt. Während leistungsstarke Verteilnetze auf Mittelspannungsebene in städtischen Ballungsräumen gut ausgebaut sind, sind sie in ländlichen Gebieten oft nur spärlich vorhanden (Stephan und Werner 2024). Die Netzdichte korreliert demzufolge stark mit der Bevölkerungsdichte. Da Autobahnen jedoch häufig durch ländliche Regionen führen, ergibt sich ein strukturelles Problem: Die geringere Netzdichte in diesen Gebieten erschwert den Anschluss leistungsstarker Ladeeinrichtungen für elektrische Schwerlastfahrzeuge erheblich. Zudem sind die bestehenden Mittelspannungsnetze bereits stark ausgelastet und verfügen

über begrenzte (Rest-)Anschluss- und Übertragungskapazitäten. Die Planung und Umsetzung von Netzverstärkungen oder -erweiterungen sind zeitaufwändig und variieren zudem standortabhängig stark (Kippelt et al. 2022). Daher ist es wichtig, die notwendige Netzanschlussleistung betriebsabhängig genau zu prognostizieren, um einen schrittweisen Ausbau der Infrastruktur zu ermöglichen.

Für die Auslegung der Energieversorgungsanlagen und die Definition der Anforderungen an die Netzanschlüsse ist der perspektivische Leistungsbedarf entscheidend. Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge, die aktuell mit Diesel fahren, künftig strombasiert betrieben werden, unabhängig von der jeweiligen Technologie. Daher ist die maximal erwartete Verkehrsdichte ein entscheidender Faktor für die Dimensionierung der Netzkapazitäten.

Für **Ladestandorte (LSO) mit stationärer Ladung (BEV/LIS)** werden in verschiedenen Veröffentlichungen für stark frequentierte Standorte bzw. Höchstlastszenarien Leistungsbedarfe im mittleren zweistelligen bis hin zum dreistelligen MVA-Bereich prognostiziert (Einfach Laden; Stephan und Werner 2024). Dieser Leistungsbedarf kann perspektivisch nur aus Hochspannungsnetzen im Direktanschluss gedeckt werden und macht einen entsprechenden Netzausbau erforderlich. Hierbei ist mit Planungs- und Errichtungszeiten von bis zu 10 Jahren zu rechnen, wodurch die Erreichung der Klimaschutzziele gefährdet wird. Daher könnten anderen Technologien als Ergänzung sinnvoll sein.

ERS bieten systembedingt die Chance, durch eine räumliche Verteilung der benötigten Ladeleistung eine Minderung der erforderlichen lokalen Netzanschlussleistung zu erreichen. Dabei können die Anschlüsse an die Netzinfrastruktur (z.B. Mittelspannungsnetze) örtlich flexibler gewählt werden, da diese im Gegensatz zu BEV/LIS nicht durch bestehende Park- und Rastanlagen geographisch determiniert sind (Hein et al. 2024). Zusätzlich können Pufferspeicherlösungen eingesetzt werden. Dies ist aufgrund großer Herausforderungen hinsichtlich der anforderungsgerechten Dimensionierung und Wirtschaftlichkeit jedoch zu prüfen und vor allem partiell in frühen Phasen des Hochlaufs denkbar (Kippelt et al. 2022).

BWS können erforderliche lokale Netzanschlussleistung durch intelligentes Lademanagement und die Vorhaltung von Lagerbatterien verringern. Diese Systeme können Lastspitzen kappen und so die Netzbelastung zeitlich gleichmäßiger verteilen. Allerdings ist die Skalierbarkeit begrenzt. Insbesondere bei hoher Auslastung kann die temporär benötigte Gesamtleistung für das gleichzeitige Laden vieler Batterien die vorhandene Netzanschlussleistung übersteigen. In solchen Fällen wäre ein Ausbau des Netzes oder ein Anschluss an das Hochspannungsnetz erforderlich, was ähnliche Herausforderungen wie bei den stationären Ladepunkten mit sich bringt. Obwohl BWS in ihrer Vollauslastung einem Ladestandort mit Pufferspeichern ähneln und somit eine große Netzanschlussleistung benötigen könnten, bieten sie Chancen in der Anfangsphase der Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs (Kilian 2023b). Sie ermöglichen eine flexible Anpassung an die Netzkapazitäten und können dazu beitragen, die Investitionskosten und technischen Herausforderungen eines sofortigen, umfassenden Netzausbaus zu reduzieren.

Wasserstoff wird in diesem Kontext nicht näher betrachtet. Hinsichtlich des Kriteriums Netzintegration im Sinne einer streckenbegleitenden Integration der Ladeinfrastruktur in die vorgelagerten Energienetzstrukturen wäre Wasserstoff jedoch als risikoarm zu beurteilen. Die Energieversorgung mittels Wasserstoff geht jedoch mit anderen systembedingten Herausforderungen einher (z.B. Übertragung und Verteilung, Speicherung, Zuführung des Energieträgers Wasserstoff). Wasserstofftankanlagen unterscheiden sich beispielsweise

grundlegend von herkömmlichen Dieseltankanlagen, insbesondere durch die Notwendigkeit, den Wasserstoff unter hohem Druck zu speichern und zu handhaben. Dies führt zu erhöhten Sicherheitsanforderungen und verlängerten Tankzeiten pro Lkw. Darüber hinaus stellt die Logistik des Wasserstofftransports eine Herausforderung dar, die zusätzliche Kosten verursacht und für die es derzeit nur begrenzte und noch nicht umfassend erprobte Lösungen gibt (Stöckl et al. 2021).

Ein zeitnaher Ausbau der Energieversorgungsnetze entlang der Hauptverkehrsachsen ist für die Versorgung des elektrischen Schwerlastverkehrs technologieunabhängig unbedingt erforderlich. Mittel- bis langfristig ist für hohe Verkehrsaufkommen ein erforderlicher Anschluss an das Hochspannungsnetz erwartbar notwendig, was jedoch mit zeitaufwändigen Planungs- und Genehmigungsprozessen einhergeht. Um trotzdem eine bedarfsgerechte Leistungsverfügbarkeit im Technologiehochlauf bis hin zum Zielzustand zu gewährleisten, sind ein frühzeitig mit dem Netzbetreiber abgestimmter Ladeinfrastruktur- und Netzausbauplan notwendig und Konzepte zur Minderung der Netzanschlussleistung umzusetzen (Kippelt et al. 2022).

4.5 Infrastrukturaufbau: Bedarf, Investitionsvolumen, Geschwindigkeit und Fläche

Im Bereich *Infrastrukturaufbau* wurden der Bedarf an Infrastruktur sowie deren Migrationaufwand in den bestehenden Straßenraum, das notwendige Investitionsvolumen, die erreichbare Ausbaugeschwindigkeit und der Flächenbedarf als relevante Kriterien identifiziert. Die zentrale Leitfrage ist dabei, wie der infrastrukturseitige Transformationsprozess hin zu alternativen/strombasierten Antriebstechnologien unter der Wahrung von bestehenden Logistikprozessen und Wirtschaftlichkeit erreicht werden kann.

CLUSTER: INFRASTRUKTURAUFBAU	
Kriterium: Bedarf an Infrastrukturaufbau	
<p>Motivation</p> <p>Die Einführung elektrischer Antriebstechnologien im Schwerlastverkehr erfordert technologieunabhängig den Aufbau von öffentlicher und privater (Lade-)Infrastruktur. Die Kenntnis des konkreten Infrastrukturbedarfs ist mit Blick auf die Umsetzung eines Technologiehochlaufs und die Wirtschaftlichkeit essenziell.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Welcher neue Infrastrukturbedarf wird für die jeweilige Technologiekonfiguration in Abhängigkeit der Verkehrsanforderung erwartet? Welche Charakteristika weist die Infrastruktur auf (öffentlich, privat, zentral, kleinteilig, usw.)?</p>

Kriterium: Investitionsvolumen		
<p>Motivation</p> <p>Das Investitionsvolumen für die (Lade-)Infrastruktur ist ein maßgeblicher Faktor für die Umsetzung und den Ausbau von Technologien und kann eine initiale Hürde für deren Einführung darstellen.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Wie hoch sind die notwendigen Investitionen, um die Infrastruktur abhängig vom betrachteten Einsatzszenario zu implementieren?</p>	
<p>Niedriges Risiko</p>		<p>Hohes Risiko</p>
Kriterium: Ausbaugeschwindigkeit		
<p>Motivation</p> <p>Eine entsprechend hohe Ausbaugeschwindigkeit der erforderlichen (Lade-)Infrastruktur für alternative Antriebstechnologien ist eine Prämisse für die Erreichung der Klimaziele im angestrebten Zeitraum.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Wie schnell kann die benötigte Infrastruktur stufenweise unter Berücksichtigung der Erreichung der Klimaziele errichtet werden?</p>	
<p>Niedriges Risiko</p>		<p>Hohes Risiko</p>
Kriterium: Flächenbedarf		
<p>Motivation</p> <p>Die Flächenverfügbarkeit für Infrastrukturanlagen ist begrenzt. Es ist davon auszugehen, dass technologieunabhängig ein zusätzlicher Flächenbedarf für Lade- und Netzinfrastruktur erforderlich wird. Ein zu großer Flächenbedarf kann ein Hemmnis für den Infrastrukturaufbau und somit für den Technologiehochlauf darstellen.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Wie viel zusätzlicher Flächenbedarf ist für Lade- und Netzinfrastruktur zu erwarten? Können Bestandsflächen für Energiebereitstellungsinfrastruktur (z.B. Tankstellen) genutzt werden und welcher Aufwand ist damit verbunden?</p>	
<p>Niedriges Risiko</p>		<p>Hohes Risiko</p>

Die Umstellung des Schwerlastverkehrs auf die Basis-Technologiekonfiguration der BEV mit stationärer Ladung erfordert einen umfangreichen Ausbau sowohl öffentlicher als auch privater Ladeinfrastruktur. Mit Blick auf die Umsetzung des Technologiehochlaufs und die Wahrung der Wirtschaftlichkeit ist die genaue Kenntnis des **Infrastrukturbedarfs** essenziell. Da die Reichweiten von **BEV** begrenzt sind, werden insbesondere im Fernverkehr LSO mit hohen Ladeleistungen benötigt, um die Lkw während der gesetzlichen Lenkzeitpausen zu laden. Dies erfordert eine Ladeinfrastruktur, deren Verfügbarkeit auch unter zeitlich und

örtlich variierenden Verkehrsbedingungen sichergestellt sein muss, um die logistischen Abläufe nicht zu beeinträchtigen (TUD, FuE-Zentrum FH Kiel 2024).

Im Gegensatz zu **ERS** ist bei stationärer **LIS und BWS** mit geringerem straßenseitigen Infrastrukturbedarf zu rechnen, da diese nur punktuell und nicht kontinuierlich entlang der Strecke errichtet werden müssen. Für die **Wasserstofftechnologie** sind zusätzlich Verteilungsinfrastruktur sowie Elektrolyseure zur Produktion von grünem Wasserstoff erforderlich. Besondere Herausforderungen bestehen bei Technologien wie **Stromschienen und induktiven Ladesystemen**, die einen erheblichen Infrastrukturaufwand erfordern, da bestehende Straßen umfassend umgebaut werden müssen. Die bauliche Integration dieser Technologien in die Fahrbahn stellt eine signifikante Herausforderung dar, da Straßen ein abgeschlossenes und hinsichtlich der Instandhaltung sensibles System bilden (Stephan und Werner 2024).

Die **Investitionen** in die notwendige Infrastruktur für den Schwerlastverkehr variieren in Abhängigkeit des Infrastrukturbedarfs. Dies führt zu einem komplexen Optimierungsproblem, das durch gegenseitige Abhängigkeiten geprägt ist. Die Größe und Zusammensetzung der künftigen Fahrzeugflotte bestimmt die Auslegung der Infrastruktur, was wiederum die Systemkosten beeinflusst, die teilweise oder vollständig auf die Nutzer umgelegt werden könnten. Daraus resultieren entsprechende TCO für die Nutzer, welche wiederum die Entwicklung der Flottenstruktur beeinflussen können. Dieser Prozess ist stark von den spezifischen Szenarien, exogenen Annahmen und der resultierenden Hochlaufplanung geprägt und erlaubt somit keine sichere Prognose des notwendigen Investitionsvolumens, sondern nur Abschätzungen für spezifische Szenarien. Prinzipiell folgt die Bewertung des Investitionsvolumens daher näherungsweise der Einschätzung zum Infrastrukturbedarf. Um einen entsprechenden Rahmen für die Infrastrukturplanung und spätere Kostenprognose zu schaffen, ist die Festlegung von Ladestandorten bzw. Wasserstoff-Tankstellen gemäß der EU-Verordnung über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe (AFIR) eine initiale Randbedingung. In der Hochlaufphase müssen diese Standorte bedarfsgerecht ausgelegt werden, wobei auch Komplementärtechnologien und entsprechende Synergieeffekte auf die Kostenentwicklung berücksichtigt werden sollten. Diese sind im Planungsprozess zu analysieren und die Ergebnisse nach exogenen Kriterien (wie z.B. geographischer Lage, Straßenkapazitäten, bestehender Infrastruktur, aktuelle Verkehrsstärken) zu konsolidieren, um eine effiziente und nachhaltige Infrastrukturplanung sicherzustellen.

Die **Ausbaugeschwindigkeit** ist von zahlreichen Unsicherheiten geprägt, wie der Dauer von Planungs- und Genehmigungsverfahren, Skaleneffekten oder der Verfügbarkeit qualifizierter Arbeitskräfte. Daher kann sie nur als qualifizierte Abschätzung auf Basis vorhandener Erfahrungen, Herstellerangaben und Analogieschlüssen zu verwandten Technologien bestimmt werden. Bei **stationärer LIS** ist die Ausbaugeschwindigkeit der Ladestationen nur dann hoch, wenn der Netzausbau nicht berücksichtigt wird. Privatakteure könnten **Ladestationen** in etwa 1,5 Jahren genehmigen und errichten lassen (Hackmann 2024). Dies trifft möglicherweise auch auf **MCS** zu, wenngleich hier signifikante Unsicherheiten aufgrund der technologischen Reife bestehen. Die dominante zeitliche Restriktion stellt jedoch der Netzausbau und -anschluss dar, der bei Mittelspannung zwischen 0,5 und 2 Jahren, bei Hochspannung jedoch bis zu 10 Jahre dauern kann (Hackmann 2024).

Diese Restriktionen würden auch bei **BWS** greifen (insbesondere bei Auslegung auf den Zielzustand). **ERS mit Oberleitung** profitieren von bereits existierenden Pilotstrecken und umfassenden Technologieerprobungen, die wesentliche Erfahrungen für die Integration in den Straßenraum, die Verkehrsdurchführung und die Logistik liefern. Dies kann zu einem schnelleren bedarfsgerechten Roll-out und einer schnelleren Adaption des Systems führen.

Induktive ERS und **ERS mit Bodenstromschiene** stehen dagegen vor erheblichen Herausforderungen, da viele Fragen zur Integration in den Straßenraum, zu den baulichen, verkehrlichen und elektrotechnischen Wechselwirkungen sowie zu Betrieb, Instandhaltung und Verfügbarkeit noch unbeantwortet sind. Diese Systeme erfordern umfangreiche strukturelle Anpassungen im Langstreckeneinsatz und eine dauerhafte Systemintegration mit der Fahrbahn, was letztlich einen Neubau aller entsprechenden Autobahnabschnitte und den damit verbundenen Planungs- und Errichtungsaufwand bedeuten könnte. Für die **Wasserstofftechnologie** kommen zusätzlich Herausforderungen hinsichtlich einer stabilen Versorgungsinfrastruktur sowie spezifische Anforderungen an Lagerung und Transport hinzu, die den Hochlauf maßgeblich verzögern könnten. (Stephan und Werner 2024)

Die **Flächenverfügbarkeit** für Ladeinfrastrukturanlagen entlang der Verkehrsachsen ist begrenzt. Bereits jetzt gibt es überbelegte Lkw-Parkplätze, insbesondere auf Park- und Rastanlagen an den Bundesautobahnen (Hackmann 2024; Jöhrens et al. 2024; Kippelt et al. 2022). Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gab schon für 2018 einen Lkw-Stellplatzmangel von über 20.000 fehlenden Stellplätzen an (Irzik 2019), Schätzungen des BGL gehen sogar von bis zu 40.000 fehlenden Lkw-Stellplätzen aus (BGL 2019). Wenn zukünftig noch mehr Lkw mit zusätzlichen Anforderungen an den Rastanlagen verkehren, kann das zu einem entscheidenden Showstopper werden. Denn für eine umfangreiche Erweiterung von Rastanlagen muss zuvor Baurecht geschaffen werden, was plan- und genehmigungsrechtlich lange dauert oder örtlich mangels Flächenverfügbarkeit sogar unmöglich sein kann.

Aufgrund der längeren Lade- als Tankzeiten bei **stationärer LIS** ist davon auszugehen, dass für nahezu alle parkenden Lkw individuelle Ladeplätze errichtet werden müssen. Aktuelle Standflächen für Sattelzüge und Lastzüge auf Park- und Rastanlagen werden mit etwa 70 m² pro Lkw bemessen. Erste planerische Untersuchungen gehen von einer Vergrößerung auf 100 m² bis 200 m² pro Lastzug aus (Bundesanstalt für Straßenwesen 2021; Gerstein et al. 2023). Dies schließt die zusätzliche Ladeinfrastruktur selbst sowie notwendige geometrische Erweiterungen für die Fahrprozesse (Schleppkurven) ein. Bei gleichem Verkehr ergäbe sich in Summe eine Vergrößerung der Park- und Rastanlagenflächen um Faktor 1,5 bis 2, was im Extremfall einer Verdopplung der Anlagen entlang der Hauptverkehrsachsen gleichkommt (Stephan und Werner 2024). **ERS mit Oberleitung** machen dagegen die Errichtung umfangreicher Anlagen entlang des Fahrweges oder über diesem erforderlich. Es entfallen dafür aber jegliche baulichen und energietechnischen Erweiterungen an Rast- und Parkplätzen.

Für **BWS** müssen an Rastanlagen zusätzliche Batteriewechselstationen einschließlich der Batterielager errichtet werden. Diese fallen pro Lkw voraussichtlich größer aus als die bisherigen Tankanlagen. Zudem muss die bestehende Verkehrsführung grundlegend verändert werden, da alle Lkw beim Anfahren der Rastanlage in die Batteriewechselstation fahren müssen. Dies ist bei Tankstellen aktuell so nicht notwendig. An den Parkplätzen ändert sich hingegen nichts, da keine individuellen Ladeplätze vorgesehen werden müssen. **Wasserstoff**-Tankstellen sind größer und aufwändiger als herkömmliche Dieseltankstellen. Durch die längeren Tankzeiten und den größeren Flächenbedarf pro Zapfpunkt ist von einer Flächenvergrößerung der Tankanlagen auszugehen. Hierfür sind Zusatzflächen und Baurecht erforderlich. An der Verkehrsführung und Parkplatzinfrastruktur ändert sich hingegen nichts.

4.6 Kritikalität: Rohstoffbedarf

Der Bereich *Kritikalität* umfasst die Betrachtung des Bedarfs an kritischen Rohstoffen. Im Zuge des Screenings liegt der Fokus auf der Identifizierung besonders relevanter kritischer

Rohstoffbedarfe je Technologiekonfiguration. Der Bedarf kann massenseitig nur semi-quantitativ abgeschätzt werden.

CLUSTER: KRITIKALITÄT	
Kriterium: Bedarf an kritischen Rohstoffen	
<p>Motivation</p> <p>Neben den Treibhausgasemissionen ist der Ressourcenaufwand einer Technologiekombination zur Reduktion von Umweltschäden und zur Skalierbarkeit der Technologie entscheidend. Ein zu hoher Bedarf an kritischen Rohstoffen kann die Antriebswende durch knappebedingte Preiserhöhungen verzögern.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Mit welchem Bedarf an kritischen Rohstoffen ist die Technologie verbunden? Welche Rohstoffe werden in welchen Mengen für Infrastruktur und Fahrzeuge benötigt?</p>

Bei der Bewertung des Rohstoffbedarfs ist die Menge der Rohstoffe in Verbindung mit der jeweiligen Kritikalität zu betrachten. Aus EU-Perspektive als kritisch eingestufte Rohstoffe (European Commission 2023) umfassen zum einen die typischen Batteriematerialien Lithium, Nickel, Mangan, Kobalt und Graphit. Doch auch die in verschiedensten Anwendungen enthaltenen Rohstoffe Aluminium und Kupfer werden als kritisch eingestuft. Als Stromsammler werden sie in Batterien verwendet, und Kupfer ist in vielen elektrischen Infrastrukturen relevant. Neben den Batteriematerialien sind zudem die Rohstoffe der H₂-FCEV-Technologiekonfiguration zu beachten: Das in Brennstoffzellen eingesetzte Platin sowie Titan, Yttrium, Scandium und Iridium in den verschiedenen Typen von Elektrolyseuren sind allesamt kritisch (acatech und DECHEMA 2022; DERA 2022; European Commission 2023).

Die Kritikalität umfasst dabei verschiedenste Aspekte wie z.B. die Konzentration der Produktion, also die Abhängigkeit von bestimmten Ländern, und das Nachfragewachstum. Bezogen auf die Batteriematerialien ist Lithium beim Nachfragewachstum am relevantesten (McKinsey & Company 2023), während Graphit (Franceschini und Nesossi 2018; USGS 2024) und Kobalt (BGR 2019; Mlambo und Adetiba 2020; USGS 2024) bezüglich der Konzentration der Produktion in Ländern mit hohem sozialem Risiko besonders relevant sind.

Betrachtet man die Fahrzeuge der verschiedenen Technologiekonfigurationen, fällt zunächst der hohe Bedarf an kritischen Rohstoffen für die Antriebsbatterie von **BEV** auf. Die Menge ist hierbei abhängig von der Zellchemie und benötigten Akkukapazität, die wiederum vom Anwendungsfall (Verteiler- vs. Fernverkehr) und von der Infrastrukturabdeckung und -auslegung abhängt. Die Entwicklungen bei den Batterietechnologien wie steigende Energiedichten und alternative Zellchemien (z.B. kobaltfreie Zellchemien und Alternativen zu Lithium-basierten Batterien wie Natrium-Ionen-Batterien) sowie vermehrtes Batterierecycling können das wachsende Rohstoffproblem mindern (Hettesheimer et al. 2023; Pelzeter et al. 2022). BEV bleiben jedoch abhängig von leistungsstarken Batterien, was angesichts des steigenden Einsatzes typischer Batterierohstoffe insbesondere in den strategisch wichtigen Anwendungsfeldern der E-Mobilität und der erneuerbaren Energien (European

Commission 2020; NOW GmbH 2023b) ein Risiko für diese Technologiekonfiguration darstellt.

ERS-Fahrzeuge haben aus Ressourcensicht den Vorteil kleinerer Batterien. Bei Fahrzeugen, die induktiv laden, gilt dies nicht in dem Maße wie bei der Oberleitung und der Stromschiene, da kein vollständiger Traktionsleistungsbezug möglich ist (Bernard et al. 2022; Koebel 2014; Panchal et al. 2018). Durch das dynamische Laden während der Fahrt kann zudem das Nachladen der Batterien mit geringeren Ladeleistungen im Vergleich zum stationären Schnellladen realisiert werden, was einen positiven Einfluss auf die Batterielebensdauer der Fahrzeuge haben kann. Bei **BWS** gilt letzteres aufgrund der Vorhaltung von Lagerbatterien ebenfalls. Diese Vorhaltung von Batterien führt jedoch auch dazu, dass insgesamt mehr Batterien als beim BEV benötigt werden, wodurch der Vorteil der potenziell längeren Lebensdauer wieder ausgeglichen werden kann. Da **E-Trailer** als REX verwendet werden, entsteht hier ein zusätzlicher Bedarf an Batterieressourcen im Vergleich zur BEV-Basistechnologiekonfiguration.

H₂-FCEV sind mit einer deutlich kleineren Batterie als BEV ausgestattet, jedoch ist hier zusätzlich die Platinbeladung der Brennstoffzelle bei der Bewertung der Ressourcenkritikalität zu berücksichtigen. **H₂-ICEV** haben weder eine Antriebsbatterie noch eine Brennstoffzelle, sodass bei dieser Technologiekonfiguration nur der Rohstoffbedarf der H₂-Infrastruktur relevant ist.

Die Allokation der Rohstoffbedarfe der **Infrastruktur** zum Fahrzeug bzw. zur Technologiekonfiguration ist sehr komplex und bedarf weiterer Untersuchungen. Bei der Festlegung von Abschneidekriterien stellen sich die Fragen, welche der vielen kritischen Rohstoffe betrachtet werden und bis zu welcher Ebene der Infrastruktur der Einsatz dieser Rohstoffe berücksichtigt wird. Kupfer wird in allen betrachteten Infrastrukturen eingesetzt, z.B. im Fahrdraht der Oberleitung (Wietschel et al. 2017) und in sämtlichen (Lade-)Kabeln. Die Zuordnung zu den Fahrzeugen ist jedoch abhängig von der jeweiligen Auslastung der Infrastrukturen, was die Vergleichbarkeit erschwert. Zudem werden diverse weitere kritische Materialien in Infrastrukturkomponenten eingesetzt wie etwa der Elektronik der Ladesäulen, Wechselrobotern der BWS, Unterwerken der ERS, Magnetspulen bei der Induktion (Panchal et al. 2018) und H₂-Elektrolyseuren (acatech und DECHEMA 2022; DERA 2022; FVV 2022). Bei dem Vergleich mit der Diesel-Referenz sollte man darüber hinaus berücksichtigen, dass die zukünftigen PtX-Vorketten ebenfalls mit entsprechenden Rohstoffaufwänden verbunden sind (FVV 2022).

Eine quantitative Analyse der Rohstoffbedarfe der Technologiekonfigurationen ist im Rahmen des Screenings insbesondere hinsichtlich der Infrastruktur noch nicht möglich. Die qualitativen Erläuterungen zeigen jedoch, dass nicht allein die Batterien in BEV kritische Rohstoffe benötigen und voraussichtlich keine Komplementärtechnologie zum BEV mit stationärer Ladung eine vollständige Vermeidung jeglicher Herausforderungen beim Rohstoffbedarf erreichen dürfte. Neben den Minderungspotentialen bei den Batterien selbst bestehen jedoch auch Minderungspotentiale bei Komplementärtechnologien, auf die, in Abwägung mit den anderen Kriterien, im Falle verschärfter Rohstoffprobleme zurückgegriffen werden kann.

4.7 Politik: Entscheidungsnotwendigkeit

Im Bereich „Politik“ wurde die Entscheidungsnotwendigkeit auf politischer Ebene als besonders relevant identifiziert. Bewertet wird die Abhängigkeit von politischer Unterstützung und die daraus resultierende Risikoabschätzung der relevanten Akteure für den Markthochlauf der neuen Technologien.

CLUSTER: POLITIK	
Kriterium: Entscheidungsnotwendigkeit der Politik	
<p>Motivation</p> <p>Entscheidungsbereitschaft und -notwendigkeit auf politischer Ebene beeinflussen das Handeln privater Akteure und die Geschwindigkeit der Antriebswende.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Wie sehr ist der Roll-Out der Technologie abhängig von staatlichen Entscheidungen? Wie stark muss in der Markteinführungsphase staatlich gefördert werden? Wie sehr beeinflusst die staatliche Entscheidungsnotwendigkeit die Risikoabschätzung der Akteure?</p>

Die Mehrkosten von **BEV** gegenüber der Dieselreferenz werden in 2030 voraussichtlich bereits durch geringere Betriebskosten ausgeglichen (Jöhrens et al. 2023), sodass staatliche Subventionen zur Einführung der neuen Technologie mittelfristig nicht mehr nötig sein werden. Das kurzfristige Aussetzen des deutschen KsNI-Förderprogramms nach dem Urteil des Bundesverfassungsgerichts zum Klima- und Transformationsfonds im Herbst 2023 hat die Logistikbranche zwar verunsichert, jedoch wird dies die nachhaltige Transformation hinsichtlich der BEV wahrscheinlich nur zeitlich verzögern und stellt mittelfristig kein grundsätzliches Risiko für die Einführung der Basis-Technologiekonfiguration der BEV mit stationärer LIS dar (Werwitzke 2024a). Die Ausschreibung des initialen öffentlichen Lkw-Ladernetzes (NLL 2024a; b) ist zudem ein Bekenntnis der Politik zu dieser Technologiekonfiguration. Die Infrastrukturbasis des betrieblichen Depotladens sowie die Möglichkeit des sukzessiven Aufbaus der öffentlichen LIS mit Unterstützung oder sogar im Alleingang der Privatwirtschaft senken darüber hinaus das Risiko bezüglich der Abhängigkeit von Politikentscheidungen.

Ähnliches könnte auch für **E-Trailer** gelten, die zwar in Kombination mit batterieelektrischen Sattelzugmaschinen höhere Anfangsinvestitionen bedeuten, dafür aber bereits in einer Übergangsphase zur Emissionsreduzierung konventioneller Sattelzüge günstiger als ganze BEV angeschafft werden könnten und von der gleichen Depot-LIS profitieren wie die BEV. Insgesamt fehlen hier jedoch noch belastbare wissenschaftliche Untersuchungen.

Die Infrastruktur für **BWS** kann ebenfalls zunächst bedarfsorientiert von Privatakteuren aufgebaut werden. Eine Herausforderung dabei wäre jedoch, wenn mangels einheitlicher Batteriestandards nur einzelne Hersteller BWS für ihre eigenen Fahrzeuge anbieten würden. Die Abhängigkeit von der Entscheidungsbereitschaft der Politik reduziert sich bei dieser Technologie daher auf das Risiko eines ausbleibenden Batteriestandards, der Voraussetzung für die herstellerübergreifende Ausweitung ist.

Bei **ERS** ist der Infrastrukturaufbau besonders stark abhängig von einer politischen Pfadentscheidung. Die Technologiekonfiguration basiert auf einem verfügbaren Mindestnetz an ERS-Infrastruktur, dessen Aufbau zentral organisiert werden müsste. Eine Umlegung der Kosten für ein solches Netz auf die Lkw-Betreiber ist erst bei einem hohen Nutzungsgrad realisierbar, sodass eine Vorfinanzierung mit erheblicher Unterstützung durch die Politik notwendig wäre (Jöhrens et al. 2020). Die entsprechenden Fahrzeuge werden zudem erst gekauft, wenn die Infrastruktur steht (ITF 2023), was den Hochlauf der Technologiekonfiguration verzögern könnte.

Bei den **H₂**-basierten Technologiekonfigurationen ist eine Abhängigkeit von staatlicher Subventionierung der Energiekosten zu erwarten, da diese selbst bei optimistischen Annahmen auch langfristig für Mehrkosten im Vergleich zum BEV sorgen dürften (Jöhrens et al. 2022, 2023; Wietschel et al. 2023). Infrastruktureitig ist der sukzessive Aufbau von H₂-Tankstellen zwar auch durch privatwirtschaftliche Akteure möglich, jedoch ist zum Ankurbeln der Technologieeinführung ähnlich wie bei ERS ein flächendeckendes öffentliches Netzwerk nötig (ITF 2023). Das Investitionsrisiko ist zudem hoch, da die Nachfrage nach Wasserstoff im Straßenverkehr angesichts günstigerer Optionen wie der BEV mit stationärer Ladung unklar ist (ITF 2023). Eine weitere Herausforderung, die mit staatlichen Entscheidungen verwoben ist, ist die ausreichende Versorgung mit (insbesondere grünem) Wasserstoff. Diese ist neben der Förderung lokaler Elektrolysekapazitäten abhängig von Wasserstoff-Importen und entsprechenden infrastrukturellen Voraussetzungen sowie Vereinbarungen mit anderen Staaten hierzu (BMWK 2023, 2024; Kittel et al. 2023).

4.8 Synthesekriterien

Die erarbeitete Bewertungsmatrix enthält drei Kriterien, die starke Bezüge zu einer Vielzahl anderer Kriterien aufweisen und sich mithin aus diesen ableiten. Sie werden hier als „Synthesekriterien“ bezeichnet und geben Aufschluss über die (potentielle) systemische Wirkung der betrachteten Technologien auf dem Weg der Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen Straßengüterverkehr.

CLUSTER: SYNTHESE	
Kriterium: Geschwindigkeit von Antriebswende und Emissionsminderung	
<p>Motivation</p> <p>Die Geschwindigkeit der Antriebswende entscheidet über die Gesamtmenge der noch im Güterverkehr entstehenden Klimagase.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Wie hoch sind die aus den Einzelkriterien ableitbare technologiespezifische Hochlaufgeschwindigkeit und kurzfristige Emissionsminderung? Wie schnell ist die Einbindung der jeweiligen Technologie in bestehende Regularien möglich (z.B. EU-ZEV-Regulierung)?</p>
<p>Niedriges Risiko</p>	
	<p>Hohes Risiko</p>

Kriterium: Langfristiger Beitrag zur Klimaneutralität	
<p>Motivation</p> <p>Technologieentscheidungen können das Langfristziel der Klimaneutralität stark beeinflussen.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Ist die jeweilige Technologiekonfiguration für das Ziel der Klimaneutralität 2045 geeignet? Sind Fahrzeuge und Infrastruktur national und darüber hinaus skalierbar? Können die Vorketten der Fahrzeuge und der Energie vollständig defossilisiert werden? Wie sehr tragen die einzelnen Technologiekombinationen zu einem defossilisierten Technologieportfolio bei?</p>
Kriterium: Risiken durch Pfadabhängigkeiten	
<p>Motivation</p> <p>Pfadabhängigkeiten können dazu führen, dass der theoretische Nutzen einer Technologie nicht realisiert werden kann, weil durch die Rahmenbedingungen in der Praxis suboptimale Nutzungsszenarien begünstigt werden oder unerwünschte Nebeneffekte verursacht werden.</p>	<p>Fragestellung</p> <p>Bestehen technologische, regulatorische, institutionelle, finanzielle, energiesystemische oder mentale Pfadabhängigkeiten, die die faktische Defossilisierung durch die betreffende Technologie in Frage stellen?</p>

BEV mit stationärer LIS sind hinsichtlich Technologie und Marktentwicklung derzeit im Leistungsbereich bis 350 kW von allen betrachteten Technologien eindeutig am weitesten vorangeschritten. Sie werden von fast allen Herstellern als die zentrale Technologie gesehen, um die deutlich verschärften CO₂-Grenzwerte für das Jahr 2030 einzuhalten (NOW GmbH 2023a). Über die Hälfte der Neuzulassungen in 2030 sollen nach den Prognosen der Hersteller BEV sein. Hürden für diese Technologie abzubauen kann daher unmittelbar und kurzfristig die Antriebswende beschleunigen.

BEV können erneuerbaren Strom prinzipiell sehr flexibel nutzen, wenn gesteuert geladen oder sogar temporär Energie ins Netz zurückgespeist wird (Gaete-Morales et al. 2024). Die Wahrscheinlichkeit, dass ihr Strombedarf langfristig fast ausschließlich erneuerbar gedeckt wird, ist daher hoch. Es verbleiben aber relevante Emissionen aus der Fahrzeugherstellung, insbesondere der Batterieherstellung. Für deren Vermeidung wäre eine vollständige Defossilisierung auch der Fahrzeugproduktion erforderlich (Biemann et al. 2024), was aufgrund der internationalen Produktion voraussichtlich erst deutlich nach 2045 erfüllt sein wird. Hier verbleiben also erhebliche Herausforderungen mit Blick auf die globale Klimaneutralität, die aber durch die neue EU-Batterieverordnung und die geplanten Höchstwerte für einen CO₂-Fußabdruck der Batterien auch bereits politisch in den Blick genommen wurden (EU-Batterieverordnung 2023).

Mit Blick auf Pfadabhängigkeiten besteht bei BEV das Risiko, dass ihre flächendeckende Einführung im Güterfernverkehr sehr große Batteriekapazitäten bedingt. Dies könnte insbesondere dann eintreten, wenn das (v.a. öffentliche) Infrastrukturangebot nicht als zuverlässig wahrgenommen wird und große Risikoaufschläge bei der Reichweite gefordert werden. Hieraus könnten sich hohe Ressourcenbedarfe (mit entsprechenden Verfügbarkeitsrisiken) sowie erhöhte THG-Lebenszyklusemissionen ergeben. Andererseits sind bereits heute neue Batterietechnologien an der Schwelle zur Markteinführung, die zumindest deutlich geringere Bedarfe kritischer Rohstoffe aufweisen bzw. bestimmte kritische Rohstoffe komplett vermeiden (z.B. Natrium-Ionen-Batterien anstelle der bislang üblichen Lithium-Ionen-Batterien). Zudem sorgen steigende Energiedichten bei gleicher Zellchemie für geringere Emissionen pro Batteriekapazität (Biemann et al. 2024).

E-Trailer stellen eine Ergänzung zu BEV dar und können als Range-Extender fungieren. Sie nutzen dieselbe Infrastruktur und haben prinzipiell das technische Potential, den Einsatzbereich von BEV kurzfristig auszudehnen. Entscheidend dabei wird sein, ob kurzfristig Produkte zur Verfügung stehen, die am Markt Akzeptanz finden. Gelingt dies, so können E-Trailer die Antriebswende und Emissionsminderung beschleunigen. Ihr langfristiger Beitrag zur Klimaneutralität ist ähnlich wie bei BEV einzuschätzen. Hinsichtlich möglicher Pfadabhängigkeiten ist bedeutsam, inwiefern der Betrieb von E-Trailern in Kombination mit Diesel-Sattelzugmaschinen eine Rolle spielen wird. In diesem Fall könnten E-Trailer die Ausflottung von Diesel-Sattelzugmaschinen und damit die Antriebswende insgesamt potentiell verlangsamen.

BWS könnten prinzipiell Nadelöhre bei der Einführung von BEV/LIS adressieren (Zeitbedarf fürs Laden unterwegs sowie in begrenztem Umfang unzureichende Netzanschlussleistung¹). Allerdings ist für ihre Einführung kurzfristig ohne Normierung eher ein Szenario wahrscheinlich, in dem ein (oder einzelne) Hersteller vorangeht und BWS-Infrastruktur zusammen mit kompatiblen Fahrzeugen auf den Markt bringt. Solch ein Szenario könnte einerseits ein herstellerübergreifend koordiniertes Vorgehen bei der Antriebswende (wie es aktuell bei der Normung und Vorbereitung des Megawattladens praktiziert wird) infrage stellen und auf diesem Wege Unsicherheit schüren, die sich negativ auf die Geschwindigkeit der Antriebswende auswirken könnte. Andererseits ist aber auch möglich, dass technologische Konkurrenz im Bereich der Batterie-Lkw die Antriebswende beschleunigen könnte – z.B. dann, wenn chinesische Akteure versuchen, die BWS-Technologie in Europa zu etablieren². Im Bereich der Pfadabhängigkeiten wurden hingegen keine Risiken identifiziert.

ERS sind bei der systemischen Bewertung insofern ähnlich einzuordnen wie BWS, als auch diese Technologie prinzipiell bestimmte Hürden beim flächendeckenden Einsatz von BEV (Ladezeiten, Flächenbedarf für Ladeinfrastruktur entlang von Fernstraßen sowie ggf. räumlich stark konzentrierte sehr hohe Leistungsbedarfe) umgehen helfen kann. Aufgrund der hohen Abhängigkeit von koordinierter staatlicher Aktivität zum Aufbau eines ERS-Netzes ist es derzeit aber unwahrscheinlich, dass ein hinreichend großes ERS-Netz schnell genug realisiert werden kann, um die Herausforderungen der Einführungsphase von BEV/LIS im Fernverkehr bedeutend zu lindern. Aufgrund der hohen Effizienz der Energienutzung und des vergleichsweise geringen Materialeinsatzes (kleinere Batterien als bei BEV) haben ERS bei noch nicht vollständig defossilisiertem Hintergrundsystem von allen Technologien den geringsten THG-Ausstoß über ihren Lebensweg (Biemann et al. 2024), jedoch nur geringfügig weniger als BEV/LIS. Aufgrund der Skalierungseigenschaften von ERS (die Effizienz

¹ Bei höheren Verkehrsleistungen sind allerdings auch BWS potentiell von Restriktionen beim Netzanschluss in dem Maße betroffen, wie der mittlere Leistungsbedarf der Wechselstationen steigt.

² In China ist derzeit bereits etwa die Hälfte der neu zugelassenen Lkw BWS-fähig (Cui et al. 2023).

steigt mit dem Verkehrsaufkommen) besteht hinsichtlich Pfadabhängigkeiten ein gewisses Risiko, dass der Ausbau von ERS-Infrastruktur die Rolle des Straßengüterverkehrs im Modal Split langfristig auf Kosten des systemisch effizienteren Schienengüterverkehrs zementieren könnte.

Werden alle oben genannten Technologien letztlich mit Strom aus dem Netz betrieben, so kann Wasserstoff für die Technologien **H₂-FCEV** und **H₂-ICEV** auch importiert werden und benötigt für seine Verteilung und Vertankung eine vollkommen andere Infrastruktur. Mit Blick auf die Geschwindigkeit der Antriebswende und die resultierenden Emissionsminderungen ergeben sich daraus eine Reihe von Risiken:

- Da die Märkte für (grünen) Wasserstoff derzeit noch im Entstehen sind und die künftige Nachfrage nach H₂ sektorenübergreifend voraussichtlich hoch sein wird, gibt es ein erhebliches Kostenrisiko für die Betreiber.
- Der derzeit genutzte Wasserstoff wird überwiegend aus fossilem Erdgas über Erdgasdampfreformierung gewonnen. Damit können H₂-FCEV und H₂-ICEV zunächst keinen signifikanten THG-Vorteil gegenüber der Nutzung fossilen Diesels erreichen. Bei Elektrolyse in Deutschland mit dem deutschen Strommix – so lange es noch keine Importoptionen gibt – ergibt sich mittelfristig auch kein Klimavorteil gegenüber fossilem Diesel (Biemann et al. 2024). Für die kumulierten Emissionen entstehen so Nachteile gegenüber der BEV/LIS-Technologiekonfiguration, die aufgrund der deutlich höheren Effizienz bereits mit heutigem deutschen Strommix Klimavorteile aufweist (Biemann et al. 2024).
- Die vorherrschende Unsicherheit über die Rolle von H₂ im Straßengüterverkehr führt bei Lkw-Betreibern zur Zurückhaltung bei Investitionen in alternative Antriebstechnologien, aus Sorge vor *stranded investments*.

In Summe ist somit von einem erheblichen Risiko durch H₂-Technologie für die Geschwindigkeit der Antriebswende auszugehen.

Der langfristige Beitrag von H₂-FCEV und H₂-ICEV zur Klimaneutralität hängt in erster Linie von der Entwicklung des globalen Markts für erneuerbaren Wasserstoff ab. Bei global hoher H₂-Nachfrage ist es wahrscheinlich, dass zu seiner Bereitstellung nicht ausschließlich THG-neutrale Pfade gewählt werden. Allerdings sind auch in einem weitestgehend defossilisierten globalen Energiesystem die THG-Emissionen von H₂-FCEV und H₂-ICEV aufgrund deren bedeutend schlechteren Gesamtwirkungsgrades (Well-to-Wheel) strukturell höher als die von BEV (Biemann et al. 2024). Im Vergleich zwischen H₂-FCEV und H₂-ICEV sind zudem die höheren Reinheitsanforderungen von H₂-FCEV an den Wasserstoff zu berücksichtigen, die ggf. eine Aufreinigung unter Energieeinsatz notwendig machen.

Beim Einsatz von H₂ im Straßengüterverkehr sind zudem verschiedene Pfadabhängigkeiten zu beachten. Insbesondere der absehbare Kostendruck bei den Energiekosten von H₂-Lkw (diese sind nach aktuellem Stand signifikant höher als bei BEV) könnte eine auch mittelfristig noch kohlenstoffintensive H₂-Bereitstellung begünstigen, solange Elektrolyse-H₂ noch mit Mehrkosten verbunden ist. Speziell bei H₂-ICEV, die für Dual-Fuel-Betrieb ausgelegt sind, ist es zudem denkbar, dass der fossile Anteil am Kraftstoff erhöht wird, wenn dies angesichts hoher H₂-Preise wirtschaftlicher sein sollte.

In Summe erscheint eine Beschleunigung der Antriebswende oder eine Verbesserung ihrer wirtschaftlichen oder treibhausgasseitigen Bilanz durch H₂-FCEV und H₂-ICEV unwahrscheinlich. Dem gegenüber stehen die oben beschriebenen Risiken und Pfadabhängigkeiten.

5 Fazit und Schlussfolgerungen

Ausgangshypothese der Analyse ist, dass batterieelektrische Lkw in Verbindung mit stationärer (Schnell-)Ladeinfrastruktur in der Antriebswende eine zentrale Rolle einnehmen werden. Mit Blick auf die aktuellen Marktzahlen haben BEV-Lkw derzeit die Nase bereits weit vorne: Mittlerweile sind in Deutschland schon über 4.600 mittlere (N2) und 700 schwere (N3) Elektro-Nutzfahrzeuge zugelassen (ifeu 2024; KBA 2024). Keine andere der untersuchten Technologiekonfiguration kann auf eine auch nur näherungsweise vergleichbare Verbreitung in Deutschland, Europa und auch global verweisen. Auch die Marktankündigungen der großen Fahrzeughersteller bestätigen den Trend zu einer Dominanz batterieelektrischer Antriebe beim zukünftigen Güterverkehr (NOW GmbH 2023a).

Ziel dieser Untersuchung war vor diesem Hintergrund vor allem zu analysieren, wo diese Basis-Technologiekonfiguration beim weiteren Markthochlauf bis hin zu einer vollständigen Defossilisierung des Straßengüterverkehrs bedeutende Schwachstellen zeigen und Herausforderungen begegnen könnte. Diese Herausforderungen wurden bezüglich ihrer möglichen Auswirkungen analysiert. Insbesondere potentielle harte Restriktionen für den weiteren Markthochlauf sind hier wichtig. Die möglichen Komplementärtechnologien werden dann hinsichtlich ihres Potenzials bewertet, diese Schwachstellen oder gar harten Restriktionen ausgleichen oder umgehen zu können.

Zunächst haben sich eine Reihe deutlicher Vorteile der Technologiekonfiguration BEV mit stationärer Ladeinfrastruktur gezeigt, die auch den aktuellen Markthochlauf unterstützt haben und die Ausgangsthese stützen, dass BEV/LIS die Antriebswende dominieren werden. Da ist zunächst die technologische Reife (v.a. CCS) zu nennen, die sich auch in der Verfügbarkeit und Ankündigungen von Fahrzeugen sowie dem bisherigen Markthochlauf zeigt. Zusätzlich sind die notwendigen Standards bereits weitgehend etabliert.

Bei dieser Ausgangslage ist die Abhängigkeit von weiteren politischen Entscheidungen vergleichsweise gering. Zwar hat die Anschaffungsförderung (KsNI-Förderprogramm) einen wichtigen Beitrag zum bisherigen Markthochlauf von E-Lkw geleistet, Analysen zeigen jedoch, dass die Mehrkosten von BEV-Lkw gegenüber vergleichbaren Dieselfahrzeugen bereits 2030 voraussichtlich durch geringere Betriebskosten ausgeglichen werden (Jöhrens et al. 2023). Staatliche Subventionen verlieren bei dieser Technologiekonfiguration also als erstes ihre entscheidende Bedeutung. Die Ausschreibung des initialen öffentlichen Lkw-Ladernetzes (NLL 2024a; b) trägt hier zusätzlich zu Handlungs- und Investitionssicherheit bei, die für andere Technologiekonfigurationen noch nicht gegeben ist. Im Gegenteil: Bei vielen anderen Technologiekonfigurationen wird weiteres staatliches Handeln für einen Markthochlauf vermutlich unerlässlich sein, auch wenn die notwendige Interventionstiefe sehr unterschiedlich ist. Auch der Infrastrukturbedarf wird eher positiv bewertet, da Infrastruktur – im Gegensatz zu ERS – nur punktuell und nicht kontinuierlich entlang der Strecke zu errichten ist und es – im Gegensatz zu H₂ – keiner grundsätzlichen neue Verteilungs- und Produktionsinfrastruktur bedarf.

Im Endeffekt ermöglichen diese Faktoren eine weiterhin hohe Ausbaugeschwindigkeit und damit wohl eine – im Technologievergleich – schnellstmögliche Antriebswende mit entsprechend positiven Effekten auf die kumulierten THG-Emissionen aus dem deutschen Straßengüterverkehr bis zum Erreichen der THG-Neutralität. Die Kombination aus BEV und stationärer LIS kann damit auch langfristig einen guten Beitrag zur Klimaneutralität leisten und vermeidet so weitgehend negative Pfadabhängigkeiten. Im Bereich der Energiekosten

wird es wahrscheinlich nur geringe Unterschiede zu flexibleren Lademöglichkeiten bei E-Trailern oder BWS geben.

Es bleiben jedoch eine Reihe von Schwachstellen, die es zukünftig zu adressieren gilt. Als zumindest kurzfristige Herausforderung verbleiben zunächst die – auch im Vergleich mit einigen anderen Technologien wie ERS, H₂-ICEV und BWS – deutlich höheren Fahrzeugkosten. Zumindest in der weiteren Einführungsphase ist fahrzeugseitig weiterhin mit erheblich höheren Anschaffungskosten zu rechnen als für Diesel-Lkw und potenziell auch einige Komplementärtechnologien. Mit dem sich abzeichnenden Markthochlauf wird jedoch auch eine weitere Kostendegression verbunden sein. Dies zeigt sich auch an den aktuell stark fallenden Batteriepreisen (BloombergNEF 2023). Da in einer Gesamtkostenbetrachtung (TCO) bereits ab 2030 eine näherungsweise Kostenparität zum Dieselantrieb erwartet wird, werden die Anschaffungskosten wohl keine entscheidende Restriktion (Showstopper) für den weiteren Markthochlauf darstellen.

Auch der operationelle Anpassungsbedarf ist bei BEV mit stationärer LIS wahrscheinlich höher als bei einigen Komplementärtechnologien (insbesondere H₂, aber auch ERS und BWS). Dies führt in Verbindung mit den höheren Anschaffungskosten zu einer derzeit teilweise noch geringeren Nutzerakzeptanz, vor allem für Anwendungen im Fernverkehr. Hier werden zumindest häufig noch Lösungen diskutiert, die einen geringeren operationellen Anpassungsbedarf versprechen (insbesondere H₂-ICEV und E-Trailer). Mit der wahrscheinlich steigenden Verfügbarkeit von MCS wird der operationelle Anpassungsbedarf jedoch auch im Fernverkehr voraussichtlich zukünftig deutlich geringer ausfallen. Zudem hat die Wirtschaftsgeschichte gezeigt, dass operationelle Anpassungen früher oder später durchgeführt werden, wenn sie erhebliche Kostenvorteile versprechen. Ein Beispiel dafür ist der (aus ökologischer Sicht fragwürdige) starke Bedeutungsgewinn des Straßengüterverkehrs gegenüber der Schiene über die Nachkriegsjahrzehnte.

Die Anschaffungskosten und der operationelle Anpassungsbedarf können daher wohl eher als kurz- bis höchstens mittelfristige Herausforderungen und kaum als langfristig harte Restriktionen für den weiteren Markthochlauf von BEV angesehen werden. Ein großflächiger Rollout der Komplementärtechnologien in diesem Zeithorizont ist jedoch unwahrscheinlich oder nur eingeschränkt möglich, sodass diese dann auch nur begrenzt zur Abmilderung dieser Herausforderung beitragen können.

Größere und wahrscheinlich auch langfristig wirksamere Herausforderungen für die Technologiekonfiguration BEV/LIS stellen jedoch der Flächenbedarf für Ladeinfrastruktur und zugehörige Stellflächen sowie der Bedarf an kritischen Rohstoffen für die großen Batterien dar. Die Flächenbedarfe für die LIS ließen sich vor allem durch den Einsatz von ERS reduzieren, da die Fahrzeuge dann vornehmlich dynamisch, also während der Fahrt mit Strom versorgt und geladen werden können. Auch BWS und H₂-Tankstellen können den zusätzlichen Flächenbedarf an Rastanlagen wahrscheinlich reduzieren, jedoch nicht vollständig vermeiden. Der Bedarf an kritischen Rohstoffen könnte ebenfalls durch ERS reduziert werden, da Batterien dann kleiner ausfallen können. Auch H₂-ICEV haben naturgemäß nur einen geringen kritischen Rohstoffbedarf. Während BWS und H₂ im Vergleich zu BEV mit stationärer LIS also voraussichtlich nur positive Effekte auf den Flächenbedarf haben, können ERS zusätzlich auch den Bedarf an kritischen Rohstoffen deutlich reduzieren.

Schlussendlich bestehen für einen weiteren Markthochlauf der Technologiekonfiguration BEV/LIS langfristig erhebliche energiesystemische Herausforderungen mit dem Potential, die Antriebswende zu verzögern, vor allem hinsichtlich der Stabilität des Energiesystems und der Netzintegration. In diesem Bereich haben dann wasserstoffbasierte Systeme (H₂-FCEV und H₂-ICEV) deutliche Vorteile. Es lassen sich aber auch durch den Einsatz von BWS und ggf. E-Trailern leichte Verbesserungen erreichen.

Für die zentrale Herausforderung der Technologiekonfiguration BEV/LIS sind die Vorteile der möglichen Komplementärtechnologien in Abbildung 1 noch einmal zusammenfassend dargestellt. Die Darstellung macht trotz aller Unschärfe einer semi-quantitativen Bewertung zum jetzigen Zeitpunkt deutlich, dass keine der diskutierten Komplementärtechnologien alle Schwachstellen der BEV/LIS-Kombination adressieren kann. BWS und E-Trailer adressieren zwar einige Bereiche, bieten dort aber nur graduelle Verbesserungen. ERS stellen dagegen eine deutliche Verbesserung im Bereich der Fahrzeuganschaffungskosten und des Flächenbedarfs dar, helfen jedoch höchstens eingeschränkt bei energiesystemischen Herausforderungen. Hier ist zudem die Entscheidungsnotwendigkeit der Politik besonders groß, so dass die kurzfristige Realisierungswahrscheinlichkeit trotz zahlreicher Vorteile eher gering ist. H₂-FCEV können dagegen durch die zeitliche Entkopplung von H₂-Produktion und Vertankung naturgemäß mehr Flexibilität für das Energiesystem bereitstellen, die allerdings auch hier in der Regel Kosten (z.B. durch geringere Auslastungsgrade von Anlagen) verbunden ist. Zudem entstehen neue Herausforderungen in gänzlich anderen Bereichen (z.B. H₂-Produktion und -Transport). **H₂-FCEV** kommen aufgrund hoher Wandlungsverluste der Produktion, des Transports und der Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen auch auf deutlich höhere Energiekosten. Noch höher sind diese bei **H₂-ICEV**, da im Verbrennungsmotor zusätzliche Wandlungsverluste auftreten. Mit Blick auf die Geschwindigkeit der Antriebswende und die resultierenden Emissionsminderungen ergeben sich daraus eine Reihe von Risiken. Der langfristige Beitrag von H₂-FCEV und H₂-ICEV zur Klimaneutralität hängt dann in erster Linie von der Entwicklung des globalen Markts für erneuerbaren Wasserstoff ab. Bei global hoher H₂-Nachfrage ist es wahrscheinlich, dass zu seiner Bereitstellung nicht ausschließlich THG-neutrale Pfade gewählt werden. Beim Einsatz von H₂ im Straßengüterverkehr sind zudem verschiedene Pfadabhängigkeiten zu beachten. Insbesondere der absehbare Kostendruck bei den Energiekosten von H₂-Lkw könnte eine auch mittelfristig noch kohlenstoffintensive H₂-Bereitstellung begünstigen, solange Elektrolyse-H₂ noch mit Mehrkosten verbunden ist. Die klimapolitischen Effekte der betrachteten Technologiekonfigurationen werden in Abbildung 2 zusammengefasst.

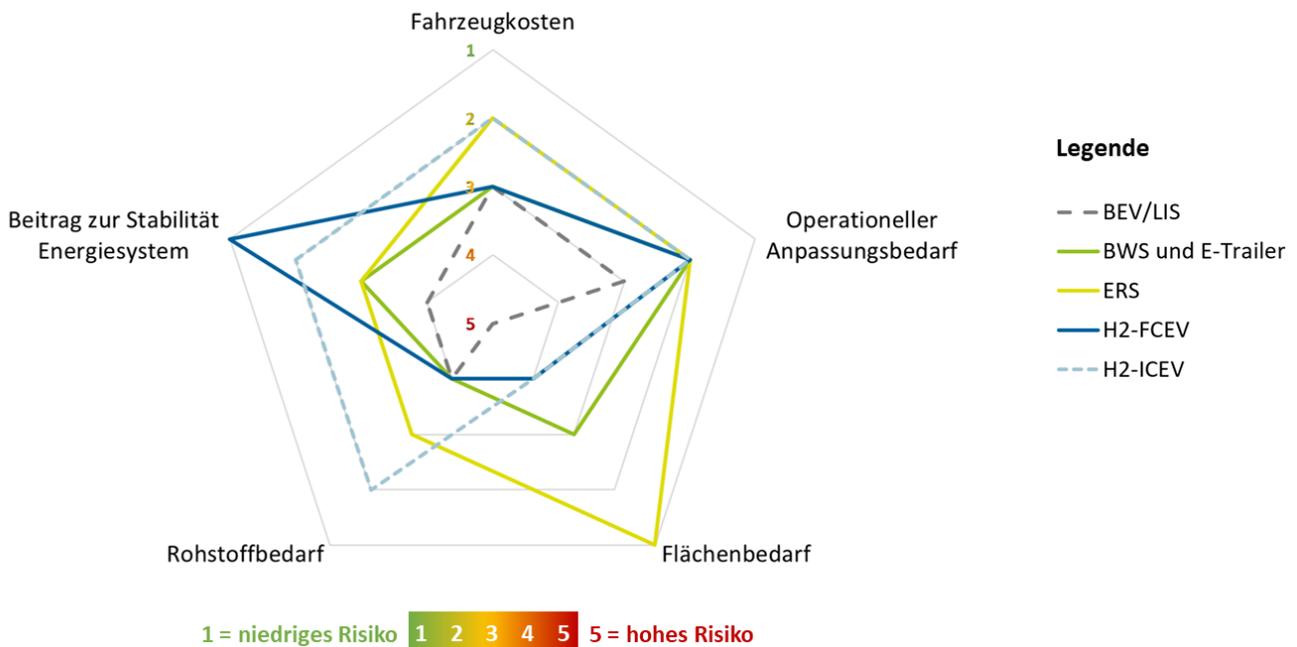


Abbildung 1: Potenzielle Komplementärtechnologien für die zentralen BEV/LIS-Schwachstellen. Erläuterung: Farben der Zahlen 1-5 beziehen sich auf die Farbskalen in Kapitel 4

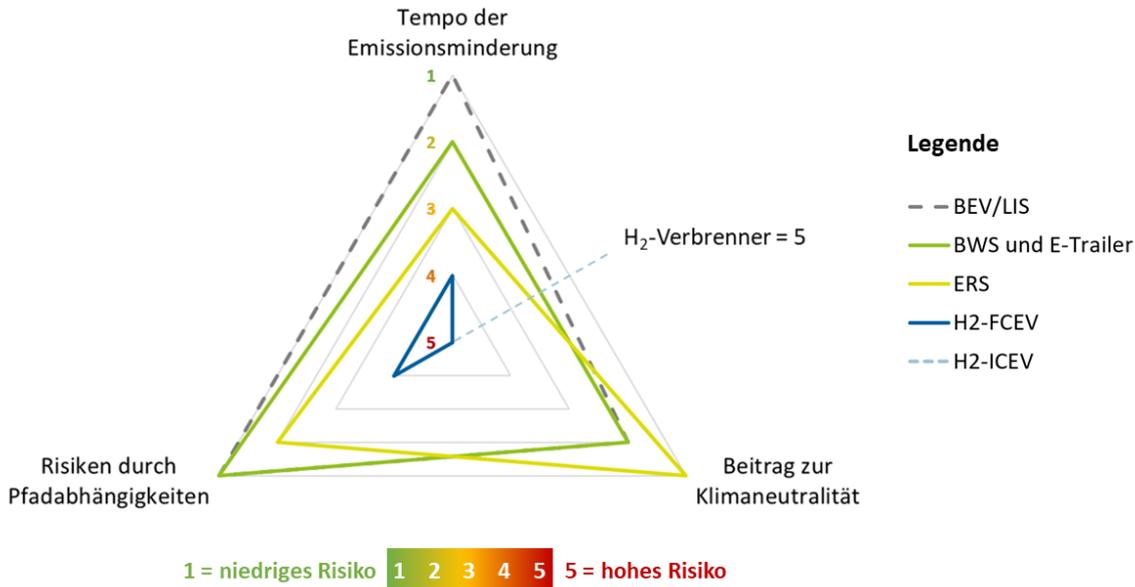


Abbildung 2: Klimapolitische Effektivität (Synthesekriterien). Erläuterung: Farben der Zahlen 1-5 beziehen sich auf die Farbskalen in Kapitel 4

Folgende grundlegende Richtungen für die Entwicklung im Straßengüterverkehr sollten daher im weiteren Projektverlauf im Rahmen der quantitativen Modellierung näher untersucht werden:

1. **Fokussierung auf die Technologiekonfiguration BEV/LIS:** Diese Referenzentwicklung unterstellt, dass der umfassende Rollout von Komplementärtechnologien durch (fehlende) politische Weichenstellung unterbleibt bzw. zu spät erfolgt. Die mit dieser Technologiekonfiguration verbundenen Schwachstellen müssten dann allein technisch und operationell gelöst werden, z.B. durch neue Batterietechnologien, Speicherlösungen und Sektorenkopplung, oder sich zumindest nicht als harte Restriktionen manifestieren. Die Modellierung dieser Option kann dabei helfen, die Schwachstellen und Restriktion zu quantifizieren und damit den möglichen Bedarf an Komplementärtechnologien genauer zu beschreiben.
2. **Ergänzung der Technologiekonfiguration BEV/LIS allein durch batteriebasierte Lösungen wie BWS oder E-Trailer:** Mindestens bei E-Trailern ist hier die Entscheidungsnotwendigkeit der Politik gering und bei BWS ist zumindest seitens privater Akteure auch ein bedarfsorientierter Aufbau denkbar. Die Pfadabhängigkeiten bleiben dabei gering. Mit der Modellierung einer solchen Entwicklung kann überprüft werden, ob diese relativ niedrigschwellige Ergänzungen ausreichend sind, um die entscheidenden Schwachstellen der Technologiekonfiguration BEV/LIS auch im Bereich des Energiesystems abzumildern bzw. welche Herausforderungen verbleiben.
3. **Ergänzung der Technologiekonfiguration BEV/LIS durch H₂-FCEV:** Diese Entwicklung unterstellt, dass H₂-FCEV entweder durch den ohnehin im Rahmen der AFIR notwendigen Rollout einer Basisinfrastruktur am Markt Fuß fassen können und/oder langfristig sogar zur Stabilisierung des Energiesystems auch im Straßenverkehr notwendig oder kostengünstiger sind. Dieser Pfad erfordert jedoch auch politische Entscheidungen – voraussichtlich auch bezüglich staatlicher Einflussfaktoren auf die langfristigen Energiekosten – und ist mit deutlichen Pfadabhängigkeiten verbunden. Die Modellierung einer solchen Entwicklung kann dabei zeigen, ob und in

welchem Umfang H₂-FCEV sinnvoll sein können, um insbesondere den energiesystemischen Herausforderungen zu begegnen.

4. **Ergänzung der Technologiekonfiguration BEV/LIS durch ERS:** Diese Entwicklung unterstellt den Rollout eines umfassenden ERS-Kernnetzes in Deutschland, vermutlich unter Nutzung der Oberleitungstechnologie. Einige zentrale Herausforderungen der Technologiekonfiguration BEV/LIS (Fahrzeugkosten, Rohstoff- und Flächenbedarf, operationeller Anpassungsbedarf) können dadurch voraussichtlich in deutlichem Maß abgemildert werden. Energiesystemisch beschränkt sich der Vorteil jedoch vor allem auf die verbesserte Netzintegration. Die vollständige Abhängigkeit von klaren politischen Entscheidungen lässt diese Entwicklung zwar vor dem Hintergrund der aktuellen politischen Situation als am wenigsten wahrscheinlich erscheinen. Die Modellierung kann aber die zahlreichen identifizierten Vorteile genauer quantifizieren, um diese den anderen Entwicklungen gegenüberstellen zu können.

Eine zentrale Frage des weiteren Projektverlaufs wird sein, welche Komplementärtechnologien in welchem Maßstab benötigt werden, um die schnelle Antriebswende und die langfristige Treibhausgasneutralität nicht entscheidend zu gefährden und welche politischen Entscheidungen dafür notwendig sind.

Literaturverzeichnis

- acatech; DECHEMA (2022): Rohstoffe für die Elektrolyseur-Produktion: Mögliche Engpässe aufgrund von Russlands Konfrontation mit dem Westen. Wasserstoff-Kompass.
- Allekotte, M.; Biemann, K.; Colson, M.; Heidt, C.; Kräck, J.; Knörr, W. (2024): Aktualisierung TREMOD/TREMOD-MM und Ermittlung der Emissionsdaten des Verkehrs nach KSG im Jahr 2023. Umweltbundesamt.
- BEE (2023): BEV Goes eHighway. BEE - BEV Goes eHighway. <https://www.bee-ehighway.de/startseite/>. (11.01.2024).
- Belingardi, G.; Scattina, A. (2023): Battery Pack and Underbody: Integration in the Structure Design for Battery Electric Vehicles—Challenges and Solutions. In: *Vehicles*. Multi-disciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 5, No. 2, S. 498–514. DOI: [10.3390/vehicles5020028](https://doi.org/10.3390/vehicles5020028).
- Bernard, M. R.; Tankou, A.; Cui, H.; Ragon, P.-L. (2022): Charging solutions for battery electric trucks. *Whitepaper*, ICCT.
- BGL (2019): 35.000 bis 40.000 Lkw-Stellplätze fehlen an deutschen Autobahnen. Bundesverband Güterkraftverkehr Logistik und Entsorgung (BGL) e.V. <https://www.bgl-ev.de/35-000-bis-40-000-lkw-stellplaetze-fehlen-an-deutschen-autobahnen/>. (27.08.2024).
- BGR (2019): Mapping of the Artisanal Copper-Cobalt Mining Sector in the Provinces of Haut-Katanga and Lualaba in the Democratic Republic of the Congo. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources, BGR.
- Biemann, K.; Helms, H.; Münter, D.; Liebich, A.; Pelzeter, J.; Kämper, C. (2024): Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr. Umweltbundesamt (UBA), ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- BloombergNEF (2023): Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of \$139/kWh. <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>. (19.08.2024).
- BMWK (2023): Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie - NWS 2023. Bundesregierung, Hrsg. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- BMWK (2024): Importstrategie für Wasserstoff und Wasserstoffderivate. Bundesregierung, Hrsg. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK).
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2021): Parkplatzdetektionssysteme mit flächenhafter Erfassung: Funktionale Kriterien. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Cui, H.; Xie, Y.; Niu, T. (2023): China is propelling its electric truck market by embracing battery swapping. International Council on Clean Transportation.
- DERA (2022): Mineralische Rohstoffe für die Wasserelektrolyse. DERA Themenheft: 26 S.; Berlin.
- Dietze, C. (2024): Elektro oder Verbrenner? Lkw-Fahrer ziehen überraschendes Fazit. In: *EFAHRER.com*. https://efahrer.chip.de/news/elektro-oder-verbrenner-lkw-fahrer-ziehen-ueberraschendes-fazit_1017388. (03.07.2024).
- Duprat, P. (2023): Alstoms vision on Electric Road Systems. *Präsentation*, Berlin.
- Electreon (2024a): ElectreonProjects. <https://electreon.com/projects>. (11.01.2024).
- Electreon (2024b): ELINA - Balingen: First public wireless electric road in Germany. <https://electreon.com/projects/elina-balingen>. (01.10.2024).
- Electreon (2024c): E|MPower - Autobahn: Wireless electric vehicle charging on the Autobahn. <https://electreon.com/projects/empower-autobahn>. (01.10.2024).
- electrive.net (2024a): Nutzfahrzeug. <https://www.electrive.net/category/nutzfahrzeug/>. (17.06.2024).

- electrive.net (2024b): Milence gibt erste beiden Standorte in Deutschland bekannt. <https://www.electrive.net/2024/05/16/milence-gibt-erste-beiden-standorte-in-deutschland-bekannt/>. (17.06.2024).
- elektro-trailer-foerderung.de (2024): Elektro-Trailer: Fragen & Antworten (FAQ). <https://elektro-trailer-foerderung.de/elektro-trailer-fragen-antworten-faq/>. (03.07.2024).
- ELISA (2022): Evidenzbasierte Forschungsergebnisse ELISA.
- e-mobil BW (2021): Systemvergleich zwischen Wasserstoffverbrennungsmotor und Brennstoffzelle im schweren Nutzfahrzeug - Eine technische und ökonomische Analyse zweier Antriebskonzepte.
- e-mobil BW GmbH (2023): H2-Infrastruktur für Nutzfahrzeuge im Fernverkehr - Aktueller Entwicklungsstand und Perspektiven.
- EU-Batterieverordnung (2023): Verordnung (EU) 2023/1542 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Juli 2023 über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG.
- European Commission (2020): Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU - a foresight study.
- European Commission (2023): Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 - Final Report.
- Franceschini, I.; Nesossi, E. (2018): State Repression of Chinese Labor NGOs: A Chilling Effect? In: *The China Journal*. The University of Chicago Press. Vol. 80, S. 111–129. DOI: 10.1086/696986.
- Fraunhofer IVI (2024): Automatisierung des Güterverkehrs. In: *Fraunhofer-Allianz Verkehr*. <https://www.verkehr.fraunhofer.de/de/Arbeitsgruppen/commercial-transport/teaser-4.html>. (03.07.2024).
- FVV (2022): Future Fuels: FVV Fuel Study IVb - Transformation of mobility to the GHG-neutral post-fossil age.
- Gaete-Morales, C.; Jöhrens, J.; Heining, F.; Schill, W.-P. (2024): Power sector effects of alternative options for de-fossilizing heavy-duty vehicles—Go electric, and charge smartly. In: *Cell Reports Sustainability*. Vol. 1, No. 6, S. 100123. DOI: 10.1016/j.crsus.2024.100123.
- Gerstein, D.; Sorayaei, M.; Wagner, P. L. (2023): Hintergrundpapier - Status quo und Anforderungen an den Ausbau der Tank- und Ladeinfrastruktur für klimafreundliche Nutzfahrzeuge in Deutschland. *Hintergrundpapier*, dena.
- Gnann, T.; Jöhrens, J.; Hacker, F.; Biemann, K.; Burghard, U.; Helms, H.; Göckeler, K.; Kräck, J.; Mottschall, M.; Plötz, P.; Scherrer, A.; Speth, D. (2023): BOLD - Accompanying research for overhead line trucks in Germany - Final report. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI.
- Göckeler, K.; Heinzlmann, J.; Hacker, F.; Lesemann, L.; Ziegler, L.; Bernecker, T. (2022): Anforderungen der Logistikbranche an einen Umstieg auf klimaschonende Fahrzeugtechnologien - Ergebnisbericht einer standardisierten Befragung. Zweiter Teilbericht des Forschungs- und Dialogvorhabens StratES. Berlin, Heilbronn: Öko-Institut e.V., Hochschule Heilbronn.
- Greisel, M.; Gebhard, M. (2022): Minimum Ambient Precooling (MAP) Hydrogen Refueling Protocol for 35MPa Heavy Duty Vehicles (20-42.5 kg). Clean Energy Partnership, Wenger Engineering GmbH.
- H2 MOBILITY (2021): Wasserstoffbetankung von Schwerlastfahrzeugen – die Optionen im Überblick.
- H2.LIVE (2024): H2.LIVE: Wasserstofftankstellen in Deutschland & Europa. <https://h2.live/>. (17.06.2024).
- Hackmann, M. (2024): Challenges Of Truck Charging. P3 group. European Symposium on Truck Megawatt Charging, Berlin.

- Hein, C. R.; Wauri, D.; Först, B.; Hepp, A.; Khan, S.; Köhler, I.; Petermann, D.; Turgut, P. (2024): Potentialanalyse Synergieeffekte dynamischer und stationärer Ladesysteme entlang von Fernstraßen.
- Heining, F.; Jöhrens, J.; Pelzeter, J.; Werner, M.; Ruscher, M.; Schill, W.-P. (2024): Kriterienet zur Bewertung von Technologiekonfigurationen für elektrische Lkw.
- Hettesheimer, T.; Neef, C.; Rosellón Inclán, I.; Link, S.; Schmaltz, T.; Schuckert, F.; Stephan, A.; Stephan, M.; Thielmann, A.; Weymann, L.; Wicke, T. (2023): Lithium-Ion Battery Roadmap - Industrialization Perspectives toward 2030. Fraunhofer ISI.
- Hobbie, H.; Lieberwirth, M. (2024): Compounding or Curative? Investigating the impact of electrolyzer deployment on congestion management in the German power grid. In: *Energy Policy*. Vol. 185, S. 113900. DOI: [10.1016/j.enpol.2023.113900](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113900).
- Hoberg, F. (2022): Autonome Lkw: Sind sie die Rettung für den Fahrermangel? ADAC. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/ausstattung-technik-zubehoer/autonomes-fahren/autonome-lkw/>. (03.07.2024).
- ifeu (2024): My eRoads-Tool - Datenbank Elektro-Lkw-Modelle. <https://www.my-e-roads.de/de-DE/export/fahrzeuge>. (17.06.2024).
- IRU (2024): Europe Truck Driver Shortage Report 2023. International Road Transport Union.
- Irzik, M. (2019): Lkw-Parksituation im Umfeld der BAB 2018. Bundesanstalt für Straßenwesen.
- ISO (2024): ISO/AWI 19885-3. ISO - Standards. <https://www.iso.org/standard/89206.html>. (13.08.2024).
- ITF (2023): How governments can bring low-emission trucks to our roads – and fast. International Transport Forum Policy Papers International Transport Forum Policy Papers. DOI: [10.1787/80680242-en](https://doi.org/10.1787/80680242-en).
- Jöhrens, J. (2022): My eRoads - Ergebnisse der ersten Onlinebefragung: Rahmenbedingungen, Kriterien und strategische Aspekte bei der Antriebswahl. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Klimke, J.; Pelzeter, J.; Räder, D. (2023): My eRoads - Der Weg zu einem klimaneutralen Lkw-Verkehr. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg.
- Jöhrens, J.; Allekotte, M.; Heining, F.; Helms, H.; Räder, D.; Köllermeier, N.; Waßmuth, V. (2022): Vergleichende Analyse der Potentiale von Antriebstechnologien für Lkw im Zeithorizont 2030. ifeu, PTV Transport Consult, Heidelberg / Karlsruhe.
- Jöhrens, J.; Rucker, J.; Kräck, J.; Allekotte, M.; Helms, H.; Biemann, K.; Schillinger, M.; Waßmuth, V.; Paufler-Mann, D.; Frischmuth, F.; Gerhardt, N. (2020): Roadmap OH-Lkw: Einführungsszenarien 2020-2030. ifeu, PTV Transport Consult, Fraunhofer IEE, Heidelberg.
- Jöhrens, J.; Werner, M.; Schill, W.-P.; Ruscher, M.; Allekotte, M.; Heining, F. (2024): enER-Syn Schwerpunktpapier #3: Komplementärtechnologien zu BEV-Lkw - ein techno-ökonomischer Vergleich.
- KBA (2024): Jährliche Sonderauswertung des Kraftfahrzeugbestands und der Neuzulassungen des Kraftfahrtbundesamtes für TREMOD. Kraftfahrt-Bundesamt.
- Kilian, O. (2023a): Die eHaul-Fahrzeuge sind da. eHaul. <https://www.ehaul.eu/post/uebergabe-fahrzeuge>. (15.08.2024).
- Kilian, O. (2023b): Eröffnung der eHaul-Wechselstation – zentrale Erkenntnisse. eHaul. <https://www.ehaul.eu/post/erkenntnisse-wechselstationseroeffnung>. (18.06.2024).
- Kippelt, S.; Probst, F.; Greve, M. (2022): Einfach laden an Rastanlagen – Auslegung des Netzanschlusses für E-Lkw-Lade-Hubs. Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur (NOW).

- Kirchem, D.; Schill, W.-P. (2023): Power sector effects of green hydrogen production in Germany. In: *Energy Policy*. Vol. 182, S. 113738. DOI: [10.1016/j.enpol.2023.113738](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113738).
- Kittel, M.; Kirchem, D.; Schill, W.-P.; Kemfert, C. (2023): Nationale Wasserstoffstrategie konsequent und mit klarem Fokus umsetzen. In: *DIW Wochenbericht*. DIW - Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. DOI: [10.18723/DIW_WB:2023-41-1](https://doi.org/10.18723/DIW_WB:2023-41-1).
- Koebel, C. (2014): PRIMOVE Road I-II Schlussbericht. Bombardier.
- Link, S.; Stephan, A.; Speth, D.; Plötz, P. (2024): Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. In: *Nature Energy*. Nature Publishing Group. S. 1–8. DOI: [10.1038/s41560-024-01531-9](https://doi.org/10.1038/s41560-024-01531-9).
- McKinsey & Company (2023): Battery 2030: Resilient, sustainable, and circular. McKinsey & Company - Automotive & Assembly. <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/battery-2030-resilient-sustainable-and-circular>. (28.02.2024).
- Mlambo, D. N.; Adetiba, T. C. (2020): Post-1994 South Africa's peacekeeping and military intervention in Southern Africa, reference from the Democratic Republic of Congo (DRC) and Lesotho. In: *Journal of Public Affairs*. Vol. 20, No. 1, S. e1984. DOI: [10.1002/pa.1984](https://doi.org/10.1002/pa.1984).
- Mottschall, M.; Jöhrens, J.; Gnann, T.; Hacker, F.; Göckeler, K.; Heining, F.; Helms, H.; Burghard, U.; Scherrer, A. (2023): Herausforderungen und Handlungserfordernisse für eine erfolgreiche Gestaltung des Markthochlaufs von Oberleitungs-Lkw – Diskussionspapier. Berlin, Heidelberg, Karlsruhe: Öko-Institut, ifeu, Fraunhofer ISI.
- Nieß, F. (2024): Positive Zwischenbilanz: Noerpel testet H2-Lkw. Eurotransport. <https://www.eurotransport.de/artikel/positive-zwischenbilanz-noerpel-testet-h2-lkw-11309333.html>. (26.08.2024).
- NLL (2024a): Netzanschlüsse für das Lkw Ladenetz - Informationsveranstaltung für standortzuständige Verteilnetzbetreiber. Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur.
- NLL (2024b): LISKON 24 - Ladeinfrastruktur-Konferenz 2024 des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr. Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur.
- Noto, F.; Mostofi, H. (2023): Acceptance Analysis of Electric Heavy Trucks and Battery Swapping Stations in the German Market. In: *Systems*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 11, No. 9, S. 441. DOI: [10.3390/systems11090441](https://doi.org/10.3390/systems11090441).
- NOW GmbH (2023a): Marktentwicklung klimafreundlicher Technologien im schweren Straßengüterverkehr - Auswertung der Cleanroom-Gespräche 2022 mit Nutzfahrzeugherstellern.
- NOW GmbH (2023b): Factsheet: Elektromobilität und Rohstoffe - Bedarfe und Verfügbarkeiten.
- Panchal, C.; Stegen, S.; Lu, J. (2018): Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. In: *Engineering Science and Technology, an International Journal*. Vol. 21. DOI: [10.1016/j.jestch.2018.06.015](https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015).
- Pelzeter, J.; Bach, V.; Henßler, M.; Ruhland, K.; Finkbeiner, M. (2022): Enhancement of the ESSENZ Method and Application in a Case Study on Batteries. In: *Resources*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Vol. 11, No. 6, S. 52. DOI: [10.3390/resources11060052](https://doi.org/10.3390/resources11060052).
- Pressemitteilung EP (2024): Transport Committee pushes for “greener” trucks and buses. News - European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20240212IPR17627/transport-committee-pushes-for-greener-trucks-and-buses>. (02.07.2024).
- Ryan, A. (2024): Four key takeaways from the Battery Electric Truck Trial. FleetNews. <https://www.fleetnews.co.uk/features/four-key-takeaways-from-the-battery-electric-truck-trial>. (02.07.2024).
- Salomon, J. (2024): Nachhaltige Lkw in der Logistik | FESH - Zwischenbilanz und Perspektiven. Kiel.

- Schaal, S. (2022): Batterien für Elektro-Lkw: Diese Pläne haben die deutschen Hersteller. *electrive.net*. <https://www.electrive.net/2022/08/09/batterien-fuer-elektro-lkw-diese-plaene-haben-die-deutschen-hersteller/>. (18.06.2024).
- Stephan, A.; Werner, M. (2024): Autobahn unter (Gleich-)Strom - Was kommt auf uns zu? In: *eb - Elektrische Bahnen*. No. 7–2024.
- Stöckl, F.; Schill, W.-P.; Zerrahn, A. (2021): Optimal supply chains and power sector benefits of green hydrogen. In: *Scientific Reports*. Nature Publishing Group. Vol. 11, No. 1, S. 14191. DOI: [10.1038/s41598-021-92511-6](https://doi.org/10.1038/s41598-021-92511-6).
- Trailer Dynamics (2024): eTrailer. Trailer Dynamics. <https://trailerdynamics.de/etrailer/>. (18.06.2024).
- TU Berlin (2024): UniSwapHD - Projektbeschreibung. <https://www.tu.berlin/fvb/forschung/laufende-projekte/uniswaphd>. (01.10.2024).
- TUD, FuE-Zentrum FH Kiel (2024): Whitepaper - Dekarbonisierung des Straßengüterverkehrs. TU Dresden - Professur für Elektrische Bahnen; Forschungs- und Entwicklungszentrum FH Kiel GmbH.
- USGS (2024): Mineral Commodity Summaries 2024. In: *U.S. Geological Survey*.
- Werner, M.; Schiebel, M.; Stephan, A. (2024): DC-Elektrifizierung von Autobahnen - Einblicke in die Begleitforschung des Feldversuchs FeSH. In: *eb - Elektrische Bahnen*. Vol. 122, No. Heft 1-2.
- Werwitzke, C. (2023): Feldtest: eActros kommt mit eTrailer auf 600 km Reichweite. *electrive.net*. <https://www.electrive.net/2023/05/09/feldtest-eactros-kommt-mit-etrailer-auf-600-km-reichweite/>. (18.06.2024).
- Werwitzke, C. (2024a): Auf Stimmenfang: Was das Aus der KsNI-Förderung für die Lkw-Branche bedeuten würde. *electrive.net*. <https://www.electrive.net/2024/02/01/auf-stimmenfang-was-das-aus-der-ksni-foerderung-fuer-die-lkw-branche-bedeuten-wuerde/>. (11.07.2024).
- Werwitzke, C. (2024b): Japaner testen Fuso eCanter mit Wechselbatterien in Kyoto. *electrive.net*. <https://www.electrive.net/2024/08/10/japaner-testen-fuso-ecanter-mit-wechselbatterien-in-kyoto/>. (15.08.2024).
- Wietschel, M.; Gnann, T.; Kühn, A.; Plötz, Dr. P.; Moll, C.; Speth, D.; Buch, J.; Boßmann, Dr. T.; Stütz, Dr. S.; Schellert, M.; Rüdiger, D.; Balz, W.; Frik, H.; Waßmuth, Dr.-Ing. V.; Paufler-Mann, D.; Rödl, Dr. A.; Schade, Dr. W.; Mader, S. (2017): Machbarkeitsstudie zur Ermittlung der Potentiale des Hybrid-Oberleitungs-Lkw. Fraunhofer ISI, Fraunhofer IML, PTV Transport Consult GmbH, TU Hamburg-Harburg – IUE, M-Five, Karlsruhe.
- Wietschel, M.; Weißenburger, B.; Rehfeldt, M.; Lux, B.; Zheng, L.; Meier, J. (2023): Preiselastische Wasserstoffnachfrage in Deutschland – Methodik und Ergebnisse. HY-PAT Working Paper 01/2023. Karlsruhe: Fraunhofer ISI.
- Zeyen, M. (2024): Overview of DC charging standardization and MCS - European Symposium on Truck Megawatt Charging 2024 (Folien). VANCOM.
- ZF (2024): Electrified-Trailer-Technologie von ZF - Der Effizienz-Boost für jeden LKW. ZF Friedrichshafen AG. https://www.zf.com/products/de/cv/stories_content_pages/electrified_trailer_solution.html. (18.06.2024).